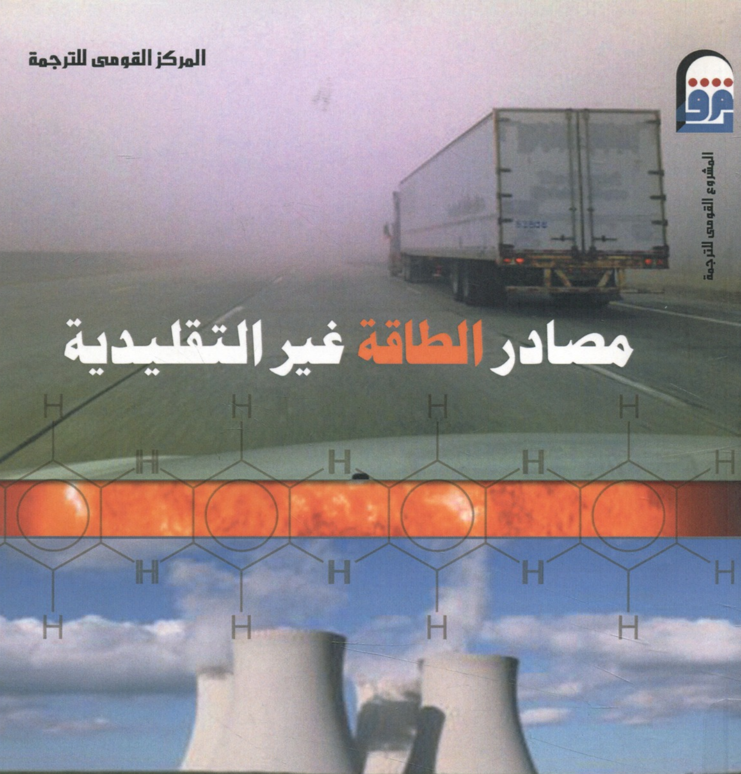
المركز القومى للترجمة



مصادر الطاقة غير التقليدية

تأليف: د.س.شاوهان
س.ك.سريفاستافا

ترجمة وتقديم
عاطف يوسف محمود

1832

مصادر الطاقة غير التقليدية

المركز القومى للترجمة
إشراف: جابر عصفور

- العدد: 1832
- مصادر الطاقة غير التقليدية
- د. س. شاوهان، وس. ك. سريفاستافا
- عاطف يوسف محمود
- الطبعة الأولى 2012

هذه ترجمة كتاب:

Non-Conventional Energy Resources (2nd Edition)

By: D.S. Chauhan & S.K. Srivastava

Published in arrangement with New Age International (P) Ltd.
Publishers., New Delhi, India.
www.newagepublishers.com

شارع الجبلاية بالأوبرا– الجزيرة– القاهرة. ت: ٢٧٣٥٤٥٢٤ فاكس: ٢٧٣٥٤٥٥٤
El Gabalaya St. Opera House, El Gezira, Cairo.
E-mail: egyptcouncil@yahoo.com Tel: 27354524 Fax: 27354554

مصادر الطاقة غير التقليدية

تـــأليـــف: د.س. شـــاوهـــان

س. ك. ســريفاستافا

ترجمة وتقديم: عاطف يوسف محمود



2012

بطاقة الفهرسة
إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية
إدارة الشئون الفنية

شاوهان، د. س.
مصادر الطاقة غير التقليدية / تأليف: د.س شاوهان، ش.ك. سرياستافا، ترجمة وتقديم: عاطف يوسف محمود؛
ط ١ - القاهرة: المركز القومي للترجمة، ٢٠١٢
٥٤٠ ص، ٢٤ سم
١ - مصادر الطاقة
(أ) سريفاستافا، س. ك. (مؤلف مشارك)
(ب) محمود، عاطف يوسف (مترجم ومقدم)
(جـ) - العنوان ٣٣٣,٨٢

رقم الإيداع: ٢٠١١/١٩٤٨٨
الترقيم الدولي: I.S.B.N - 978 - 977 - 704 - 434 - 9
طبع بالهيئة العامة لشئون المطابع الأميرية

تهدف إصدارات المركز القومي للترجمة إلى تقديم الاتجاهات والمذاهب الفكرية المختلفة للقارئ العربي وتعريفه بها، والأفكار التي تتضمنها هي اجتهادات أصحابها في ثقافاتهم ولا تعبر بالضرورة عن رأي المركز.

المحتويات

مقدمة المترجم

الطاقة... هى قاطرة التنمية، وما من سبيل - فى مصر أو فى أى مكان من العالم - أن تنهض تنمية دون كهرباء، فهى عصب الحياة، لذا فقد غدا تأمين إمدادات الطاقة من القضايا التى تشغل دول العالم، توخيا لحماية أمنها القومى وتأمين احتياجات الأجيال القادمة من الطاقة، بأسلوب يكفل توفير خدمات الطاقة بما يتناسب مع متطلبات التنمية.

وتقوم السياسة الرشيدة لقطاع الكهرباء على عدد من المحاور: المحور الأول هو تنويع مصادر الطاقة الكهربية، والمحور الثانى: هو الاستغلال الأمثل لمصادر الطاقة المتاحة، والمحور الثالث: تحسين الكفاءة والحفاظ على البيئة، فإذا ما بحثنا موضوع تنويع مصادر الطاقة نجد من الأقوم أن نتبع سياسة تقوم على استخدام مختلف التكنولوجيات المتاحة بالنسبة للطاقة التقليدية، فهناك المحطات البخارية، ومحطات الدورة المركبة، بالإضافة إلى المحطات الغازية، وإذا تكلمنا فيما يخص مصر عن الطاقة الهيدروليكية، سنجد أنها قد نجحت فى الاستفادة من كل المصادر المائية المتاحة لديها فى توليد الكهرباء، حيث توجد الآن قدرات مركبة على امتداد نهر النيل تبلغ نحو ٢٨٤٠ ميجاوات تخدم جزءًا كبيرًا من أراضى الوطن... ولأن تلك الأراضى مؤهلة، وتتميز بامتداد الشبكة الكهربية القومية خلالها، فهناك العديد من المشروعات والتطبيقات فى مجالى الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، ومن ثم فقد وضعت خطة تهدف إلى رفع نصيب مشاركة الطاقة المتجددة إلى ٢٠% (منها ١٢% طاقة رياح) من إجمالى إنتاج الطاقة عام ٢٠٢٠.

هذا، علمًا بأن لدى قطاع الكهرباء بمصر خططًا حتى عام ٢٠٢٧ لإضافة قدرات كهربية جديدة تصل إلى ٥٨ ألف ميجاوات وتنفيذ شبكات نقل وتوزيع لمجابهة التطور فى الطلب على الطاقة، كما يولى القطاع مشروعات الطاقة المتجددة كبير أهمية لثراء مناطق شاسعة من البلاد بالشمس والرياح، ومن المتوقع أن تبلغ قدرات التوليد المركبة مع نهاية عام ٢٠١٠، ٢٦٧٥٠ ميجاوات منها ٥٥٠ ميجاوات من مزارع الرياح، ١٤٠ ميجاوات من محطة الكريمات الشمسية، والتى ستبدأ عملها فى أواخر عام ٢٠١٠.

أما إذا تكلمنا عن الطاقة الشمسية، فإن اقتصادياتها مازالت محل تساؤل مقارنة بالبدائل الأخرى، ورغم هذا يسعى قطاع الكهرباء إلى الحصول على حزمة تمويلية لإنشاء واحدة من أربع محطات شمسية حرارية على مستوى العالم يجرى حاليًا إنشاؤها بقدرة إجمالية تصل إلى ١٤٠ ميجاوات ليبدأ الإنتاج منها فى القريب العاجل... وهكذا فإن البدائل متاحة، وبدء اللجوء إلى المحطات النووية أسبابه معروفة تعود إلى أن ما لدينا من وقود أحفورى – بل ما لدى العالم أجمع – آخذ فى النضوب، إلى جانب أن البلاد قد استنفدت كل المصادر المائية.

من هنا كانت أهمية البحث عن مصادر بديلة وملائمة للطاقة، ومن هنا تنبع أهمية هذا الكتاب الذى يتقصى بالتحليل والتفصيل مصادر الطاقة غير التقليدية.

وبمقدور مصادر الطاقة غير التقليدية أن تحل مشكلتين متلازمتين من مشاكل الإمداد بالطاقة، فهى من جهة تحقق اللامركزية فى التزويد بها، ومن جهة أخرى تسهم فى المحافظة على نظافة البيئة، وتقف إلى جانب مصادر الطاقة التقليدية الآيلة للنفاد وتتولى الوفاء باحتياجات المناطق الريفية.

وإذا كان الكتاب – وكاتباه هنديان – يتسم بالتركيز الشديد على ظروف الهند وملابسات البيئة فيها، فما من ريب فى إمكانية تطبيق الكثير والكثير جدًا من

معطياته على مصر باعتبارها بلدًا ناميًا، تربط ظروفها بظروف الهند وشائج قوية، وما من شك فى أن الهند فى نهضتها الحديثة التى بـــرزت بهـــا لمقدمـــة الـــدول المتطلعة للحاق بركب الدول المتقدمة، تنهض مثلاً لما يمكـــن أن تتـــأثره مـــصر وتترسم خطواته فى هذا السبيل الذى قطعت فيه الهند شوطًا لا يستهان بـــه، وكمـــا يتضح من الكتاب، فقد بلغ من اهتمام الهند بهذه القضية أن قامت بهـــا فـــى عـــام ١٩٨٢ إدارة خاصة، ما لبثت أن تحولت إلى وزارة مستقلة، ترعى شئون الطاقـــة غير التقليدية والمتجددة... وتتضمن نشاطاتها الرئيسية وضع برامج لتطوير الإفادة من الطاقة الشمسية وطاقات الرياح والمحيطات، والطاقة من الهيـــدروجين، ومـــن المصادر الحيوية والكيميائية من الفضلات والغاز الحيوى وإعادة تدوير النفايـــات والطاقة المغناطيسية – الهيدروديناميكية وغيرها.

وتولى برامج ومخططات الإفادة من مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة عناية خاصة لاستثمار التعاون مع منظمات المجتمع المحلية وتلبية احتياجاته ذات الحجم المحدود من القدرة للأغراض من قبيل الطهى والتزويد بالمياه لأغراض الـــشرب والرى والاستعمالات المنزلية، إلى جانب إنارة الطرقات، وقد أثبتت تلك البـــرامج فاعليتها بصفة خاصة فى توفير نوع من الرفاهيـــة للقطاعـــات المحرومـــة مـــن المجتمع.

المترجم

عاطف يوسف محمود

مقدمة الطبعة الثانية

إنه لمن دواعى سرورنا أن نقدم طبعة ثانية من الكتاب... وهى طبعة منقحة ومزيدة وشاملة... ولقد أتاحت لنا هذه الطبعة الحديثة الفرصة لإدخال تحسينات ذات بال على الطبعة الأولى، وإضفاء منظور جديد على الكتاب... وقد أضيفت فى هذه الطبعة بضعة رءوس موضوعات جديدة بناءً على رغبة الطلاب واحتياجاتهم، إذ أننا نتلقى التعليمات والاقتراحات من المعلمين والطلبة من مختلف الجامعات عبر بلاد الهند كلها، ولقد وجدنا لها فائدة كبيرة فى الارتقاء بمادة الكتاب.

إننا لنعرب عن شكرنا الصادق وامتناننا العميق إلى السيد "سرى سوميا جوبتا"، العضو المنتدب لدار نيوإيدج إنترناشيونال (New Age International) بنيودلهى لإصدار الكتاب فى هذا التوقيت الملائم وهذه الصياغة المناسبة.

المؤلفان

مقدمة الطبعة الأولى

احتياجات الهند من الطاقة ضخمة ومتزايدة دائما، ولا يصل استهلاك الطاقة التجارى للفرد الواحد بها إلى عشر المتوسط العالمى... وصورة الطاقة فى الهند اليوم هى خليط متراكب من مصادر متنوعة يجرى استغلالها لتلبية احتياجات متنوعة فى المناطق الحضرية والريفية... ومن المتوقع أن يستديم هذا الاستغلال لمصادر الطاقة التقليدية وأن يستمر فى التنامى فى الهند، على أن هناك العديد من العوامل التى تحد من ذلك، مثل محدودية الاحتياطى المؤكد منها ونوعية المنتج، والاحتياج لتموين وسائل المواصلات والتقليل من التلوث البيئى، ولقد تم التحقق من أنه فى بلد كالهند تتعاظم أهمية استغلال مصادر الطاقة غير التقليدية، وقد بدئ فى السنوات الأخيرة فى استخدام تقنيات معينة من الطاقة غير التقليدية، لتأخذ مكانها فى الهند، التى تتمتع بمصادر وفيرة للطاقات المتجددة، كالطاقة الشمسية، والرياح، والطاقة من الكتل الحيوية والمحيطات... وهذا الكتاب عن مصادر الطاقة غير التقليدية ينحو إلى شرح هذه الاستخدامات للطلبة خاصة درجات البكالوريوس والماجستير، ولقد تم التركيز على أساسيات الطرق الرئيسية للتحويل المباشر للطاقة.

وبودنا أن نعرب عن عميق شكرنا وامتناننا للناشر "نيو إيدج إنترناشيونال" بنيودلهى على إخراجه للكتاب فى هذه الصورة الطيبة.

ونحن نرحب – ترحيبًا قلبيًا – بالاقتراحات من المعلمين والطلبة لإدخال المزيد من التحسينات على الكتاب مستقبلا.

المؤلفان

الباب الأول

مصادر الطاقة

مقدمة:

الطاقة عنصر حاكم فى النمو الاقتصادى، فهناك ارتباط وثيق بين توفر الطاقة المتاحة، والنمو المستقبلى لأمة ما، وعلى أية حال، ففى بلد نام كالهند، كلما زاد توفر الطاقة المتاحة، تعاظم الاحتياج إليها، وبالتالى فعلى الرغم من الزيادة فى القدرة الكهربية المولدة من ٢٠٠٠ ميجاوات فى عام ١٩٥٠ إلى ٩١١٩٠ ميجاوات بحلول نهاية عام ٢٠٠٠، فإنه من المتوقع أن تصل الذروة فى العجز إلى ٣٠%.

تستهلك الطاقة من مختلف الأشكال فى الهند، والمصادر التقليدية للطاقة (خشب الوقود، ومخلفات الحيوانات والبقايا الزراعية) ما زالت تمثل الكم الأكبر فى تلبية الاحتياجات إلى الطاقة فى مناطق الهند الريفية، وبالتدريج، تحل أنواع الوقود التجارية كالفحم، والليجنايت، ومشتقات البترول، والغاز الطبيعى، والكهرباء، محل هذه الأنواع غير التجارية من الوقود، وتشكل أنواع الوقود التجارية زهاء ٦٠% من إجمالى المنتج من الطاقة الابتدائية فى الهند، فى حين تغطى النسبة الباقية (٤٠%) أنواع الوقود غير التجارية، ومن بين الطاقة التجارية الإجمالية المنتجة فى شكل قدرة أو كهرباء، يأتى ٦٩% من الفحم ومصادر القوى الحرارية، ٢٥% من القوى المائية، و٢% من الطاقة النووية، و٤% من زيت الديزل (السولار) والغاز، وأقل من ١% من مصادر الطاقة غير التقليدية كالطاقة الشمسية، والرياح، والغازات الحيوية، ومحطات الكهرباء المائية متناهية الصغر، أما البترول ومشتقاته، فهى المصدر الكبير الآخر للطاقة.

لقد صاغت حكومة الهند – فيما يخص الطاقة – سياسة تهدف لتأمين إمداد كاف من الطاقة بالحد الأدنى من التكلفة، مع تحقيق الاكتفاء الذاتى من إمدادات الطاقة، وحماية البيئة من التأثيرات السلبية للاستغلال الجائر على مصادر الطاقة، وترسم البنود التالية الملامح الرئيسية لهذه السياسة:

أ – التعجيل باستغلال مصادر الطاقة التقليدية المحلية: خام البترول، والفحم، والقدرات الهيدروليكية والنووية.

ب– تكثيف عمليات الاستكشاف لزيادة الإنتاج المحلى من خام البترول والغاز الطبيعى.

جـ– السيطرة على الطلب على خام البترول وصور الطاقة الأخرى.

د– المحافظة على استهلاك الطاقة وحسن القيام على إدارتها.

هـ– تحقيق الاستغلال الأمثل للطاقات الموجودة بالبلاد.

و– تطوير سبل الاستفادة من مصادر الطاقة المتجددة لمجابهة الاحتياجات فى المجتمعات الريفية.

ز– تكثيف المصادر وتطوير الأنشطة فى مجالات مصادر الطاقات الجديدة والمتجددة.

ح– التدريب المنسق للعمالة المنوط بها قطاع الطاقة على مختلف المستويات الإدارية.

إن تطوير بدائل مصادر الطاقة غير التقليدية وتنميتها، سواء الجديدة أو المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والطاقة الحيوية... إلخ، تحظى باهتمام ودعم إدارة مصادر الطاقة غير التقليدية التى تأسست بالهند عام ١٩٨٢.

تصنيف مصادر الطاقة:

١ – مصادر الطاقة التجارية أو غير التجارية:

تشمل أصناف الوقود التجارية:

الفحم، واللجنايت، ومشتقات النفط، والغاز الطبيعى، والكهرباء.

وتشمل أصناف الوقود غير التجارية:

خشب الوقود، وروث الأبقار، ومخلفات الزراعة.

٢ – مصادر الطاقة التقليدية أو غير التقليدية:

تشمل المصادر التقليدية:

أنواع الوقود الأحفورى(*) (الفحم – خام البترول – الغاز الطبيعى) والطاقات المائية والنووية.

تشمل المصادر غير التقليدية (أو الطاقة البديلة):

الطاقة الشمسية – الطاقة الحيوية – طاقة الرياح والمحيطات – طاقة الهيدروجين – وطاقة الحرارة من باطن الأرض (الجيوحرارية).

٣ – مصادر الطاقة إما متجددة أو غير متجددة:

مصادر الطاقات المتجددة:

تشمل المصادر الطبيعية للطاقة، والتى لا تستنفد، ويمكن استعمالها لإنتاج الطاقة لعديد من المرات، ومن أمثلتها الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، وطاقة

(*) يقصد بها تلك المنتجة من بقايا كائنات حيوانية أو نباتية ترجع إلى عصور جيولوجية سالفة. (المترجم)

حرارة باطن الأرض، وموجات المد والجذر، وطاقة المياه، والطاقة الحيوية، والمواد المعدنية الذرية مصادر غير مستنفدة من الطاقة، عند استخدامها في تكنولوجيات تفاعلات المولدات السريعة.

مصادر الطاقة غير المتجددة:

تشمل المصادر الطبيعية التى تُستنفد ولا يمكن الإحلال محلها عند استعمالها، وأمثلتها أنواع الوقود الأحفورى كالفحم وخام البترول والغاز الطبيعى، والتى تمثل حاليًا ٩٨% من مصادر الطاقة.

الفحم:

الفحم هو المصدر الأولى للطاقة، ويمثل حوالى ٦٧% من احتياجات بلاد الهند من الطاقة التجارية، ويستعمل بشكل جوهرى فى الصناعات المعدنية والكيميائية، وتشكل القدرة الحرارية المنتجة من نوعيات الفحم متدنية الرتبة نحو ٥٢% من إجمالى الطاقة المركبة لتوليد الكهرباء بالبلاد.

تتكون رواسب الفحم من مواد متطايرة، ورطوبة وكربون إلى جانب ما يحتويه من شوائب (رماد).

وتنتمى ترسيبات الفحم فى الهند إلى الحقبتين الجوندوانية والحقبة الجيولوجية الثالثة (٩٨% من مصادر الفحم تنتمى إلى الحقبة الجوندوانية)، ويقع حوالى ٧٥% من ترسيبات الفحم فى وادى نهر "دامودار". والأماكن المرتبطة جيدًا بهذه الترسيبات هى رانيجانج فى البنغال الغربية وجاريا، وجيريديه، وباكورا وكارانبورا فى بيهار، وأودية الأنهار الأخرى التى بها ترسيبات فحمية تشمل جودوفارى وماهانادى وسون ووارِدها، وتوجد مناجم الفحم الأخرى فى نطاق

ساتبورا فى سهول تشاتيسجاره، بمادهيا براديش، كما أن هناك حقولاً ضخمة للفحم فى سينجارانى بأندهارابراديش، وتالشر بأوريسا، وشاندا فى ماهار اشترا أيضًا.

بدأت صناعة تعدين الفحم بالهند فى رانيجانج بغرب البنغال فى سنة ١٧٧٤، وقد تم تأميم نشاط تعدين الفحم فى الفترة ١٩٧٢ – ١٩٧٣، تحاشيًا لاستغلال العمالة. وينتمى نشاط إنتاج الفحم حاليًا للقطاع العام بأكمله تقريبًا، ويجرى تنظيمه من خلال "شركة الهند المحدودة للفحم"، وهى شركة قطاع مشترك بين الحكومة المركزية وحكومة أندهارابراديش.

الاحتياطيات والإنتاج:

قدرت هيئة GSI(*) احتياطيات الهند من الفحم (حتى عمق ١٢٠٠ متر) بحوالى ٢٠١٩٥٣,٧ مليون طن، وذلك فى أول يناير من عام ١٩٩٦، حوالى ٢٧% منها من النوعيات القابلة للتكويك، ٧٣% منها من غير القابلة له، وبالنظر إلى محدودية المتاح من الفحم القابل للتكويك فإن استخدامه مقصور على الأغراض الميتالورجية، فى حين أن الأنواع غير القابلة للتكويك متاحة بالبلاد، وملائمة لأغراض توليد الطاقة، والولايات المتعارف على وجود احتياطيات من الفحم بها تشمل بيهار، والبنغال الغربية، ومادهيابراديش، وأوريسا، وأندهارابراديش، وماهاراشترا.

ولقد ارتفع إنتاج الفحم إلى حدود ٢٧٠,١٢ مليون طن تقريبًا فى عام ١٩٩٥ – ١٩٩٦، مقارنة بزهاء ٧٨,١٧ مليون طن فى وقت تأميم صناعة الفحم فى عام ١٩٧٣ – ١٩٧٤، والهند تصنف بأنها ثالث أكبر منتج للفحم على مستوى العالم، وبهذا المعدل فمن المتوقع أن تفى الاحتياطيات بالاحتياجات لمدة ٢٠٠ سنة، لذا كان من المحتم أن يحافظ على الفحم ويجرى استعماله بصورة انتقائية.

(*) GSI هى هيئة المساحة الجيولوجية الهندية Geological Survey of India (المترجم)

تصنيف أنواع الفحم:

يصنف الفحم اعتمادًا على نسبة محتواه من الكربون الثابت Fixed carbon(*)، والرطوبة، والمواد المتطايرة فى ترتيب تنازلى كالآتى:

أ – الفحم الأنثراسيتى.

ب– الفحم البتيومينى.

جـ– الفحم البتيومينى السينى (Senic).

د – الليجنايت أو الفحم البنى اللون.

كما تصنف أنواع الفحم طبقًا لنسبة المادة المتطايرة إلى فئتين:

أ – **فحم قليل المواد المتطايرة:** تتراوح نسبة المواد المتطايرة فيه ما بين ٢٠، ٣٠% مع انخفاض نسبة الرطوبة، ويعرف بصفة عامة بالفحم القابل للتكويك (Coking coal)' ولهذه الفحومات خواص تكويك جيدة، وتصل نسبة الشوائب بها إلى ٢٤%، وتستخدم – سواء تم إثراؤها أو لم يتم – فى صناعة الكوك الصلد المطلوب للأغراض الميتالورجية.

ب – **فحم عالى المواد المتطايرة:** يحتوى على نسبة عالية من المواد المتطايرة، تربو على ٣٠%، ونسبة رطوبة فى حدود ١٠%، وهو فحم سريع الاحتراق يصلح فى الأساس لإنتاج بخار الماء، ويعرف عادة بالفحم غير القابل للتكويك ويستخدم فى الصناعات التى تلزمها عمليات تسخين أو توليد بخار الماء، كمحطات القوى الحرارية والقاطرات البخارية ولحرق الطوب فى الصناعات الكيميائية، وكوقود منزلى.

(*) يقصد بها كمية الكربون والمواد الصلبة القابلة للاحتراق فى المواد الفحمية بعد نزع الرطوبة والرماد والمواد المتطايرة منها (المترجم)

اللجنايت:

يُطلق على الليجنايت أيضًا مسمى الفحم البنى اللون، وهو ذو رتبة متدنيــة ويحتوى على نسبة أعلى من الرطوبة، وإذا تعرض للتحلل فإنه يتحلــل بــسهولة، ولذا فإنه – قبل استعماله – يشكل فى هيئة قوالب صغيرة، ويستخدم أساسًـا فــى محطات توليد القوى الحرارية وكوقود صناعى ومنزلى، وكــذلك فــى عمليــات الكربنة وإنتاج الأسمدة.

يحتوى الليجنايت الهندى على نسبة شوائب أقل من الموجودة بالفحم، وهــو متجانس فى خواصه.

وتتواجد ترسبات الليجنايت ذات الأهمية فى كل من تاميلنادو، وبونديشيرى، وأوتار براديش، وكيرالا، وراجاستهان، وجامو، وكــشمير. وتقــدر احتياطيــات الليجنايت ببلاد الهند بحوالى ٢٧٤٠٠(*) مليون طــن، والترســبات فــى نيفيلــى بتاميلنادو بحوالى ٣٣٠٠ مليون طن، وتكون ٩٠% من احتياطيات الليجنايت، لكن المناجم تعانى من تركيبها الارتوازى، وعملية الضخ المستمر للماء مهمــة شــاقة وجسيمة، غير أن موقع هذه الترسبات يعتبر بمثابة النعمة لتاميلنادو، فهــى تنــتج ٦٠٠ ميجاوات من القدرة الحرارية، ويعتمد تصنيع الإقليم بقدر كبير على القــدرة الحرارية المولدة من حقل الليجنايت فى نيفيلى، ويبلغ الإنتاج الــسنوى مــن هــذا المنجم المفتوح قرابة ٦,٥ مليون طن.

مشاكل تعدين الفحم:

تشمل الآتى:

أ – محدودية احتياطيات الهند من الفحم الميتالورجى، ورغــم ذلــك فــإن استنفاذ النوعيات عالية الجودة والمناسبة لصناعة الكوك، ما زالت قليلة (حوالى ٧٠ إلى ٨٠%)، وبالوسع زيادتها بميكنة عمليات التعدين.

(*) الأرقام كما وردت بالنص الأصلى. (المترجم)

ب – تقع معظم ترسبات الفحم فى مناطق شرق الهند ووسطها، فى حين تتوزع محطات القوى الحرارية وغيرها فى مواقع الاستهلاك على مدى واسع من الانتشار، مما يقتضى نقل الفحم عبر مسافات شاسعة.

جـ- حيث إن معظم مناجم الفحم تعتبر بمقياس الحجم صغيرة، فإنها تطبق أساليب بدائية فى الإنتاج، ومن ثم فإن الإنتاج لكل فرد ليس فقط متدنيًا، ولكن بكلفة إنتاج بالتبعية مرتفعة.

د – الكميات الكبيرة من الشوائب التى يسمح ببقائها فى الفحم تقلل من جودته، إلى جانب أثرها فى رفع تكلفة نقل الفحم وإحداث الإضرار بالبيئة، ويمكن تحاشيها بعمليات غسل الفحم.

هـ- يحدث فقدان لكمية كبيرة من الفحم فى صورة نفايات، تتبقى بعد فصل الفحم ويتم الاستغناء عنها، وبالإمكان تجنب هذه الفواقد إذا حول تراب الفحم أو مسحوقه إلى قوالب صغيرة.

و – النقص فى القدرة فى بعض المناطق، وعلى وجه الخصوص منطقة وادى دامور DVC(*)، ويعد عدم توفر المتفجرات والاضطرابات العمالية، ومن المشاكل الخطيرة التى تواجه هذه الصناعة.

المحافظة على الفحم:

مصادر الفحم فى الهند فقيرة، سواء فى النوعية أو الكمية، ويزيد هذا الموقف صعوبة، سوء استخدام الفحم الجيد بالحرق فى وسائل النقل أو بالصناعات، و يرجح ألا تكفى الاحتياطيات القليلة من فحم التعدين أو من فحم التكويك لأمد طويل، كما أن التعدين الانتقائى يؤدى إلى فاقد جسيم فى الفحم الخام،

(*) اختصار لعبارة Damaur Valley وهى منطقة تنمية صناعية شهيرة بالهند. (المترجم)

مع حدوث اشتعال للنيران من وقت لآخر بالمناجم وخاصة مع اتباع أساليب غير نظامية فى استخراج وتعدين الفحم، لذا فمن الجوهرى بمكان الاهتمام بالمحافظة على الفحم واستخدامه بطريقة مرشدة تم اختيارها على نحو سليم.

إن إدارة الفحم هى العامل المحورى فى إحداث التنمية ومع ترشيد استغلال الاحتياطيات من الفحم واللجنايت فى الهند، ويتأكد الترشيد فى استهلاك الفحم باسترجاع الاحتياطيات فى موضعها الأصلى أو الحقيقى، ولقد استدعت ظروف التعدين الصعبة من حيث طبيعة نوع الأرض، والتى تسود المناطق المتواجد بها الفحم، إدخال البعض من أحدث أنواع التقنيات الملائمة لاستغلال مثل هذه الترسبات، من وجهة نظر الحفاظ للفحم والسلامة الصناعية، ومن وسائل الترشيد الأخرى الفحم التى يمكن استعمالها أو اتباعها:

أ – التحفظ على فحم التكويك للاستخدام فقط فى الصناعات التعدينية، مع عدم استخدامه على الإطلاق، أو قصر استخدامه لتوليد البخار أو للنقل أو لأية صناعة أخرى على حالات الضرورة القصوى.

ب– رفع جودة الفحم من الرتبتين الثانية والثالثة، عن طريق غسيله أو مزجه بالفحم من الرتبة الأولى – فحم التكويك – ثم استخدامه فى الصناعات التعدينية.

جـ– اتخاذ الإجراءات الفعالة لوقف عمليات التعدين الانتقائى.

د – استكشاف مناطق جديدة بحثا عن احتياطيات الفحم، مع تقييمها.

هـ– حرق الفحم المحتوى على نسب عالية من شوائب، بعد فصله بطريقة الحمل بالموائع.

و – تخصيص الفحم مما لا ينبعث منه دخان للاستعمال المنزلـــى، وذلـــك بكربنته.

ز – استخدام مسحوق الفحم ونفاياته بعد تشكيله فى قوالب بواسطه القطران أو بخليط من القطران والجير.

ح – الاستعاضة عن خام البترول بالفحم المحول لغاز أو المـسال بطريقــة فيشر تروبش التصنيعية **Fischer- Tropsch synthesis**(*).

ط – معالجة الفحم المعدّن بطريقة المنجم المفتوح.

ى – التحويل المباشر للحرارة الناجمة عن احتراق الفحــم إلــى كهربــاء بالمغناطيسية الهيدروديناميكية(**).

ك – نقل الفحم وهو فى صورة غليظة القوام لتقليل نفقات النقل.

النفط والغاز الطبيعى:

النفط:

النفط سائل قابل للاشتعال مكوناته الأساسية هى الهيدروكربونات (مــن ٩٠ إلى ٩٨%)، فى حين تتكون النسبة الباقية من مركبــات عــضوية يــدخل فيهــا الأكسجين، والنيتروجين والكبريت وآثار من مركبات عضوية – معدنية، ويستخدم النفط والمشتقات البترولية، كوقود للمحركات وكزيوت، وكمصدر للمــواد الخــام اللازمة لتصنيع الكيماويات المتنوعة المطلوبة فى الصناعات المختلفة.

(*) تصنيع الهيدروكربونات بهدرجة أول أكسيد الكربون بمعاونة عامل مساعد. (المترجم)

(**) يرجى الرجوع للباب السابع. (المترجم)

أماكن الوجود:

يوجد النفط الخام فى الهند بصفة أساسية مصحوبًا بالصخور الرسوبية من الحقبتين الميزوزنية(*) والعصر الجيولوجى الثالث، والتى كانت يوما ما مطمورة تحت البحار الضحلة، وتقدر مساحة الطبقات الحاملة للزيت فى الهند بأكثر من ١,٥ مليون كيلو متر مربع (حوالى ٢/٥ مساحة البلاد الكلية)، وهذه المساحات تغطى السهول الشمالية فى وادى جانجابراهما بوترا، وفى الشريط الساحلى، وكذلك الحافة القارية البعيدة عن الساحل، وفى سهول جوجارات، وكذلك صحراء ثار، وفى المنطقة حول جزر أندامان ونيكوبار.

الاستكشاف وإدارة الإنتاج:

بدأ نشاط استكشاف النفط وإنتاجه بصورة كثيفة ومنسقة بعد تأسيس لجنة النفط والغاز الطبيعى (ONGC) فى ١٩٦٥، وهى ما تسمى الآن بالمؤسسة الهندية المحدودة للنفط (OIL)، والتى تكونت بعد اقتناء الحكومة لأسهم "شركة بورما للنفط" فى عام ١٩٨١، فصارت ثانى مؤسسة قطاع عام تنخرط فى مجال استشكاف النفط وإنتاجه فى البلاد.

وحتى استقلال البلاد فى عام ١٩٤٧، كانت أسام هى الولاية الوحيدة التى تحفر بها الآبار لاستخراج النفط وتكريره فى معمل تكرير فى مقاطعة "ديجبوى"، ورغم صغر حجمه فقد كان هذا هو حقل الزيت الوحيد الذى استمر استغلاله على مدى ١٠٠ عام دون توقف... وبعد الاستقلال ظهرت دلائل وجود ترسبات هيدروكربونية فى سهول جوجارات ومنطقة كامباى (بعيدًا عن الشاطئ).

(*) الدهر الوسيط من الحقبة الجيولوجية الثالثة. (المترجم)

على أن الاحتياطيات الكبرى وجدت - على غير المتوقع - بعيدًا عن سواحل بومباى، فيما يسمى "بومباى هاى"، على مسافة ١١٥كم من الشاطئ، وحتى الوقت الحالى تُعدّ هذه أغنى حقول النفط فى الهند.

التوزيع:

يوجد فى الهند ١٣ حوضًا ذات أهمية، تحتوى على طبقات حاملة للنفط، يمكن تبويبها فى ثلاث مناطق:

أ - حوض كامباى فى جوجارات، وحوض حزام أسام أراكان، وحوض بومباى الأرضى بعيدا عن الساحل، وجميعها أحواض يجرى الإنتاج التجارى منها.

ب - أحواض فى راجاستهان، كريشنا، كوفيرى، جودافارى، أندامان، البنغال، وتلال الهيمالايا، وادى جانجا وتريبورا، حزام ناجالاند فولد، ومن المعروف أن جميعها تحتوى على طبقات حاملة للنفط، لكن الإنتاج على المستوى التجارى من هذه المناطق لم يبدأ بعد.

جـ- التكوينات الجيولوجية فى مناطق كوتش - ساوراشترا، كيرالاكونكان، ومهانادى، ولها تركيبات جيولوجية تبشر بتواجد النفط، ومن ثم يمكن اعتبارها مناطق محتملة فى المستقبل.

الاحتياطيات والإنتاج:

تقف الاحتياطيات المؤكدة للنفط على مستوى العالم فى أول يناير عام ١٩٩٥ عند حدود ٩٩٩,٧ بليون برميل، بينما يتأرجح إنتاج النفط حول معدل ١٩ - ٢٢ مليون(*) برميل سنويًا، وبمقارنة هذين المؤشرين (الاحتياطى والإنتاج)

(*) كما ورد بالأصل وصحتها بليون. (المترجم)

يتضح أن احتياطيات العالم من النفط تكفى لمدة حوالى ٤٥ عامًا، أما فى الهند فإن احتياطيات النفط فقيرة جدا، أو محدودة بحوالى ٧٣٩ مليون طن، وذلك فى أول يناير عام ١٩٩٦، وهى فى سبيلها للنفاد فى غضون ١٥ - ٢٠ سنة. لقد زاد الإنتاج المحلى من ٠,٢٥ مليون طن فى عام ١٩٥٠ إلى ٣٥ مليون طن فى عام ١٩٩٥ - ١٩٩٦، ووصل إنتاج الزيت حدًا أقصى قدره ٣٤,٥ مليون طن فى عام ١٩٨٩ - ١٩٩٠، ثم انخفض إلى ٢٧ مليون طن خلال عام ١٩٩٢ - ١٩٩٣، ويعزى هذا بصورة كبيرة إلى إغلاق آبار الزيت التى استنفدت فى إقليم "بومباى هاى"، ومنذ ذلك الوقت زاد الإنتاج أساسًا بسبب وضع مخططات التطوير الرئيسية موضع التنفيذ، مثل التطوير الإضافى فى حقل نيلن (ل - ٢)، (ل - ٣)، وحقل جنوب هيرا بعيدًا داخل البحر صوب الساحل الغربى، ومن المخطط رفع الإنتاج إلى ٥٠ مليون طن سنويا.

ويمثل النفط الخام المستخرج من الآبار البحرية فى "بومباى هاى" زهاء ٧٥% من الإنتاج المحلى.

ويوجه نحو ٤٠% من إجمالى الاستهلاك المحلى من المنتجات البترولية إلى قطاع النقل، بينما تستخدم نسبة ٦٠% الباقية فى الصناعة بما فى ذلك توليد الطاقة، وكذلك الاستخدامات المنزلية وغيرها من الأغراض الأخرى.

مصافى التكرير:

يجرى تكرير البترول فى الهند فى ١٣ مصفاة تكرير تتبع كلها القطاع العام، وتصل طاقتها التكريرية الإجمالية السنوية إلى ٦٠,٤ مليون طن (إحصاء يونيو ١٩٩٦)، وهذه المعامل هى:

معمل باراونى (بيهار - مؤسسة للهند النفط)، بونجايجاون (ولاية أسام - مصفاة تكرير بونجايجاون)، كوتشين (ولاية كيرالا - مصفاة تكرير كوتشين)،

ديجبوى (ولاية أسام – مؤسسة الهند للنفط)، هالديا (ولاية غرب البنغال – مؤسسة الهند للنفط)، كوفالى (ولاية جوجارات – مؤسسة الهند للنفط)، مانالى وناريمانام (مدراس – مصفاة تكرير مدراس)، ماتهورا (مؤسسة الهند للنفط)، نونماتى فى جوواهاتى (ولاية أسام – مؤسسة الهند للنفط)، ترومباى (بومباى – هندوستان للبترول)، ترومباى (بومباى – بهارات للبترول)، فيساكها باتنام (أندهرا براديش – هندوستان للبترول)، وجارى إنشاء مصفتين للتكرير جديدتين فى مانجالور (كارناتاكا) وبانيبات (هاريانا)، وكلاهما يتبع القطاع المشترك.

مواطن المشاكل:

أ – الاعتماد المتزايد على الواردات من النفط والمنتجات النفطية، مما يجعلها عرضة لتقلبات أسعار النفط العالمية، وقد شكلت واردات النفط ٤٤% من الاستهلاك المحلى ومثلت بالقيمة الحسابية ٢٧% من إجمالى الواردات لعام ١٩٩٥ – ١٩٩٦، ويزيد هذا أيضًا من الشعور بالقلق فيما يخص التأمين القومى من النفط.

ب– تجمد الإنتاج المحلى من النفط الخام لبضع سنوات، بل واتجاهه إلى الانخفاض.

جـ– منذ العثور على منابع "بومباى هاى" فى ثمانينيات القرن العشرين لم يتم العثور على أى حقول نفط ذات أهمية.

د – يخضع تسعير المنتجات النفطية للظروف السياسية، ونظامه ملىء بالعيوب.

المحافظة على المنتجات البترولية:

تحظى مسألة الحفاظ على المنتجات البترولية بأولوية عالية، ولقد اتخذت الإجراءات التالية من قبل "هيئة بحوث الحفاظ على البترول " (PCRA) والتى تعمل تحت سلطة وزارة البترول والغاز الطبيعى، للحفاظ على المنتجات البترولية:

أ – خلق وعى عام إزاء الحاجة إلى الحفاظ على المنتجات البترولية.

ب– تطوير الإجراءات لكبح السلوكيات التى تؤدى إلى ارتفاع الفاقد.

جـ– تحسين كفاءة استغلال النفط فى المعدات والأجهزة ووسائل المواصلات.

د– تنشيط البحوث والتطوير لتحسين كفاءة استغلال النفط فى استخداماته النهائية المتنوعة.

هـ– تطوير بدائل استبدال أنواع الوقود، مثلما أدخل الغاز الطبيعى المضغوط (CNG) كوقود بديل فى قطاع النقل البرى.

ولتدعيم سبل تأمين الطاقة وبهدف التأكد من توفير المنتجات البترولية عبر البلاد كلها، بأقل كلفة ممكنة وعلى أسس منتظمة، انتهجت الحكومة إستراتيجية من النقاط الأربع التالية:

أ – استكشافات خارج البلاد: ستقوم شركات النفط والغاز الوطنية باستكشافات خارج البلاد مما سيتيح لها حصيلة من العملة الأجنبية اللازمة لشراء النفط .

ب– معامل تكرير جديدة: حيث سيسمح للبلاد المصدرة للبترول بإقامة معامل تكرير جديدة فى البلاد،وهو ما تقوم به حاليًا هيئات النفط والبترول فى عمان والكويت.

جـ – شبكة من خطوط الأنابيب: لتأمين النقل السريع والحر للنفط لابد من بنـــاء شبكة من خطوط الأنابيب، مما سينعكس أثره على توفير نفقات النقل.

د– الاحتياطات الإستراتجية: تهدف وزارة البترول إلى تدبير احتياطى لمدة ٤٥ يومًا فى مناطق معينة. ومن خلال ذلك يمكن للبلاد أن تواجـــه أى نقص وقتى محتمل فى البترول.

الغاز الطبيعى:

يتواجد الغاز الطبيعى إما مفردا وإما مصحوبًا بالزيت الخام، غير أن معظم المستخرج منه يأتى من المنابع المصحوبة بالزيت الخام. وتمتد احتياطيات الغــاز الطبيعى فى تريبورا وراجا ستهان، وبالتقريب فى جميع حقول النفط داخل البحــر فى كامباى – جوجارات، وبومباى هاى، وتاميلنادو، وأندهرا براد يش، وأوريسا.

وفى بلاد تعانى من نقص الطاقة – كالهند، يعد الغاز الطبيعى بمثابـــة هبـــة غالية. ويمكن استخدامه سواء كمصدر للطاقة (فى المحطات الحرارية) أو كمـــادة خام تدخل فى صناعة البتروكيماويات. ويحتاج بناء محطة القوى القائمة على الغاز الطبيعى إلى فترة أقل. وفيما يخص الزراعة فى الهند، فهناك مجال لتعزيز الإنتاج عن طريق إقامة مصانع للسماد تعتمد على الغاز الطبيعى. وتتجلى أفضلية اللجـــوء إلى الغاز فى سهولة نقله خلال أنابيب ويجرى حاليًا نقل الغاز مـــن حقولـــه فـــى بومباى وجوجارات إلى ولايات مثل مادها بـــراديش، وراجـــا ســـتهان، وأوتـــار براديش. وقد عهد إلى منظمة الغاز الهندية المحدودة (GAIL)، والتى تأسست عام ١٩٨٤ لنقل الغاز الطبيعى ومعالجته وتسويقه، بمهمة ذات أولوية، وهى إنشاء خط مواسير غاز عبر البلاد يمر بها جيرا – بيجابور – جاجا ديشبور، ويبلـــغ طولـــه ١٧٣٠ كيلو مترًا ويحمل ١٨ مليون متر مكعب من الغاز الطبيعى يوميـــا. ومـــن

المخطط أن يغذى ستة مصانع للسماد وثلاث محطات قوى، حيث سيبدأ الخط من نقطة هازيرا فى جوجارات بيجابور ومنه يمتد خط فى اتجاه ساوايماد هوبور فى راجا ستهان (مادهيابراديش وجاجديشبور) وينتهى فى أوتاربراديش. وخط الأنابيب هذا هو جزء من مشروع سيغطى شبكة الغاز الجنوبية، وهو مفهوم يخطط لنقل فائض الغاز من الحقول الغربية (البعيدة عن الساحل) إلى الولايات الجنوبية ويعززه بقدر ما هو متاح ومجد المتوفر الإضافى من الغاز المقترح استيراده من الشرق الأوسط، حيث يقترح مد خط أنابيب غاز بطول ٢٣٠٠ كيلو متر من عمان إلى الهند، حيث يوزع الغاز على كل الولايات الجنوبية.

وطبقا لبيانات إبريل ١٩٩٤ تقف احتياطيات الهند من الغاز المتاح الحصول عليه عند حدود ٧٠٠ بليون متر مكعب. ويصل حجم الطلب على الغاز الطبيعى حاليًا ٢٦٤ مليون متر مكعب يوميا، وذلك فى مقابل إنتاج إجمالى خلال ١٩٩٥ - ١٩٩٦ بلغ ٦١ مليون متر مكعب فى اليوم فقط. ويعنى هذا وجود فجوة ضخمة ما بين الطلب والعرض فيما يخص الغاز الطبيعى فى البلاد. وقد وصل الإنتاج خلال ١٩٩٥ -٩٦ إلى ٢٠,٨٦ بليون متر مكعب. فإذا ما أخذ فى الحسبان حجم الطلب المستقبلى واحتياطيات الغاز المؤكدة، فإن هذا المخزون سينفد فيما لا يزيد على العشرين عامًا.

محطات القوى:

بدأت محطات القوى فى الهند مع عام ١٩١٠، بتوريد محطة القوى الكهرومائية فى سيفاسا مودرام بكارناتاكا. وقد زادت قدرات التوليد الكهربائية بصورة هائلة منذ الاستقلال، بيد أنها لم تقوَ على ملاحقة الطلب المتزايد طبقا لحركة التصنيع السريعة والتنمية الاجتماعية والاقتصادية والتحول صوب المجتمعات الحضرية. وقد ارتفعت قدرة التوليد المركبة من رقم متواضع عام ١٩٧٤ (١٤٠٠ ميجاوات) إلى ٨٣٢٨٨ ميجاوات خلال عام ١٩٩٥ -٩٦، شملت

٢٠٩٧٦ ميجاوات من المحطات المائية، ٦٠٠٨٧ ميجاوات من المحطات الحرارية، ٢٢٢٥ ميجاوات من المحطات النووية. وتشكل المحطات الحرارية الآن ٧٤ % من إجمالى القدرة المولدة، على حين تمثل المحطات الكهرومائية ٢٤ % والباقى (٢%) يأتى من المحطات النووية.

وسواء كانت محطات القوى حرارية أو مائية، فهى أنسب صورة لتسخير الطاقة وأكثرها شمولا، ويتعاظم احتياج الصناعة (الذى يمثل ٥٠ % من إجمالى استهلاك الطاقة) إليها، وتشكل الزراعة ٢٥ %، فى حين تتوزع بقية الاستهلاك ما بين وسائل النقل والاستخدامات المنزلية والقطاعات الأخرى.

محطات القوى الحرارية:

الفحم، والنفط والغاز الطبيعى هى المصادر الرئيسية لوقود المحطات الحرارية. وهى المصادر التى ترجع إلى أصل معدنى، ومن ثم فإنها تسمى بالمثل بالوقود الأحفورى **fossil fuel**. ويعود عيبها الأكبر إلى أنها مصادر معرضة للنفاد لا يمكن للإنسان تعويضها. وعلاوة على ذلك فلا يخلو استعمالها – على النقيض من الطاقة الكهرومائية – من أضرار تلوث البيئة.

وتقع محطات القوى الحرارية بالأساس فى مناطق الصناعية الكبيرة وقرب حقول الفحم. ومن ضمن قدرة حرارية إجمالية مركبة لتوليد الكهرباء، تمثل " ماهاراشترا ١٤,١ %، والبنغال الغربية ١٣,٢%، وأوتار براديش ١٢,٨% وجوجارات ١٢,٢% وبيهار ١٢% وتاميلنادو ٩,٤% ومادهيا براديش ٧,٨% وأندرابراديش ٥,٩% ودلهى ٥,٢%. ولتطوير محطات القوى الحرارية، أسست الهيئة الوطنية للقوى الحرارية "**NTPC**" بنيودلهى فى ١٩٧٥، كشركة قطاعية مركزية، الهدف منها تعزيز التزويد بالكهرباء عن طريق تشييد محطات قوى حرارية عملاقة، فبدأت بمشروع بقدرة ٢٠٠ ميجاوات فى سينجر ولى عام

١٩٨٢. واليوم تبلغ الطاقات المركبة عن طريقها ١٦٧٩٥ ميجاوات، تشكل زهاء ٢٨% من إجمالى طاقات الهند الحرارية. وقد نجحت الهيئة فى توريد محطة قوى حرارية عملاقة فى سينجر ولى، وكوربا، وراما جوندام، وفاراكا، وفيندهياتشال، وريها ند، ودادرى، وكاهالجاون وتلتشر، وكذلك خمسة مشروعات قوى بدورات غاز مركبة(*) فى أنتا (راجا ستهان) ودادرى، وكاواس (جوجارات) وجاندهار (جوجارات).

محطات القوى المائية:

تمثل طاقة الوضع فى المسطحات المائية ببعض المناطق أرخص مصادر الطاقة وأكثرها أمانا ونظافة، والكهرباء المتولدة من طاقة المياه هى المسماة بالقدرة المائية. وبالنظر إلى محدودية مصادر الفحم والليجنايت والنفط يتنامى باطراد الاتجاه إلى القوى المحركة المائية والنووية.

المناطق الواعدة:

لدى الهند مخزون هائل متعارف عليه فى قطاع القوى المائية لم يستغل بعد. والمواقع الصالحة لتوليد القوى المائية بالهند هى:

أ – أكثر المواقع أهمية يقع بامتداد سفوح جبال الهيمالايا فى الغرب (أوتار براديش) و (هيما تشال براديش)، وفيه طاقة مؤكدة لم تستغل بعد قدرها ٥٠٠٠٠ ميجاوات.

ب– الإقليم الشمالى الشرقى به هو الآخر طاقات مائية هائلة.

(*) فى الدورة الحرارية المركبة تدمج أكثر من دورة بغرض رفع الكفاءة الحرارية باستغلال حرارة العادم الناتج من الدورة الأولى فى دورة ثانية. (المترجم)

جـ- الإقليم على امتداد غرب (جـاتس) والـذى يمـر عبـر ماهاراشـترا وكارناتاكا وتاميلاندو وكيرالا.

د - الإقليم المار عبر ساتبورا وفيندهياس وماهاديو ومايكال بوسط الهند.

هـ- نطاق المحطات الحرارية والممتد من شرق ناجبور إلى الغرب، والذى يحفّ بمناجم الفحم فى حزام (جوندوانا) .

تطور توليد القوى المائية:

أنشئت أول محطة قوى مائية بالهند عام ١٨٩٧ فى (دار جيلنج)، وتبعتهـا محطة ثانية فى سيفاسا مودارام بكارناتاكا عام ١٩٠٢. وبلغت القدرة الكلية المركبة ٥٨٨ ميجاوات فى عام ١٩٥١، ارتفعت إلى ٢٠٩٧٦ ميجاوات فى عام ١٩٩٥ - ١٩٩٦

مزايا القدرة المائية:

باستثناء ضخامة الاستثمارات الابتدائية، تتمتع محطات القوى المائية بمزايا حاسمة مقارنة بطرق توليد القوى الأخرى، فمشروعات القوى المائية لا توفر فقط مصدرًا رخيصًا للكهرباء ولكنها أيضًا متجددة بطبيعتها (فالماء مصدر متجدد دائمًا وليس عرضة للنضوب). وبعبارة أخرى فتكاليف تشغيل مشروعات القوى المائيـة وصيانتها منخفضة للغاية، فى حين أن تكلفة المدخلات فى محطات القوى الحرارية (الفحم مثلاً) أعلى بكثير. وليس هناك مشكلات فيما يتعلق بتلوث الجو أو التخلص من النفايات مع محطات القوى المائية. ومصادر الطاقة كالنفط والفحم والغاز، مما يمكن استعماله لتوليد الكهرباء آخذة فى النفاد، كما تشكل عبئًا على مصادر النقـد الأجنبى، ويمكن للقوى المائية بسهولة أن تحل محلها، وعلاوة على ذلك، فيمكن أن تفى مشروعات القوى المائية باحتياجات الرى فى المناطق الواقعة بعـد المحطـة، إلى جانب الاحتياجات للقوى.

مشكلات محطات القوى المائية:

طبقًا لتقديرات هيئة الكهرباء المركزية بالهند يصل المخزون السنوى من الطاقة الكهرومائية بالبلاد، عند معامل حمل قدره ٦٠ % إلى ٨٩٨٣٠ ميجاوات، إلا أنه تم بالكاد استغلال ٢٥% منها فقط حتى الآن. ولعل السبب يعود إلى ضخامة الاستثمارات الابتدائية وطول مدة تنفيذ المشروعات الكهرومائية بالنسبة لغيرها. والعيب الآخر لهذه المشروعات هو الاضطرار إلى نزوح السكان وتدمير البيئة والأراضى الزراعية الخصبة. ويبدو أنه لا مناص من مشكلة طول مدة التنفيذ، أما فيما يخص بمشاكل نزوح السكان وتدمير البيئة والأراضى الخصبة، فيجرى التركيز حاليًا على عدم تشييد سدود ضخمة، بل إقامة مشروعات **run-of-the-river** (التوليد مع سريان الماء بالنهر دون تخزينه). وفى حين تفضل السدود عند سفوح التلال، بحيث يمكن الإفادة منها فى رى الأراضى فيما بعد السد، تحبذ مشروعات توليد القوى من مياه النهر فى أثناء جريانه دون تخزين فى مناطق التلال العالية البعيدة عن السهول. ولا تتطلب هذه المشروعات مخزونًا مائيًا ضخمًا، بل تتولد الكهرباء من الماء المتاح بالنهر لدى توقيت معين. ولا حاجة إلى نزوح أى من السكان. من ناحية أخرى فمثل هذه المشروعات لا تضر بالغابات ولا البيئة، بيد أنها لا يمكنها زيادة توليد الكهرباء بكميات تفى باحتياجات ساعات الذروة، وهى ما توفره المشروعات الكهرومائية التى تعتمد على مخزون مائى، ومن ثم فقد يحبذ مزيج من هذين النوعين معًا.

القدرة النووية:

أدى نقص النوعيات الجيدة من الفحم، ونقص النفط والغاز الطبيعى إلى ضرورة التعجيل بتطوير قدرات الهند النووية. وتمثل القوى النووية فى الوقت الراهن ٢٤ % من إجمالى الكهرباء المولدة بالبلاد. وقد دخلت محطات القوى

النووية الهند مع عام ١٩٦٩ بتوريد أول محطة قوى ذرية فـي تـارابور بتقنيـة أجنبية، إلا أن الهند أنجزت برنامجا مشهودًا لمحطات القوى النووية بتشييد وتوريد محطة قوى " كالباكام " الذرية المحلية فى مدراس عام ١٩٨٣. ومنذ ذلـك الحـين ولدى الهند كل الإمكانيات اللازمة لإقامة محطات القوى النووية.

البرنامج ذو الثلاث مراحل:

فى عام ١٩٤٥، صاغ الدكتور "هومى ج. بهابها" برنامجا من ثلاث مراحل بهدف الوصول إلى الاعتماد الذاتى على النفس فى توليد القوى النووية باسـتخدام مصادر اليورانيوم والثوريوم المتوفرة بالهند:

المرحلة الأولى:

استعمال اليورانيوم الطبيعى (يو ٢٣٨) كوقود فى مفاعل بالماء الثقيل تحت ضغط (**PHWR**) لتوليد الطاقة وإنتاج البلوتونيوم.

المرحلة الثانية:

استعمال البلوتونيوم المنتج فى مفاعل – مولد سريع (**FBR**) **Fast breeder reactor** لإنتاج بلوتونيوم إضافى، واليورانيوم ٢٣٣ مـن الثوريـوم باسـتعمال الطاقة.

المرحلة الثالثة:

استعمال الثوريوم واليورانيوم ٢٣٣ فى دورة وقود متقدمة ومنظومة مفاعل (وهذه المرحلة رهن التطوير حاليًا).

وقد بلغت المرحلة الأولى النطاق التجارى، حيث بدأ توليد القوى من الطاقة النووية بالهند فى ١٩٦٩ بتوريد أول محطة قوى ذرية فـى (تـارابورا). ويقـدر إجمالى القدرة المركبة بمحطات القوى النووية العاملة فعلاً فى خمسة مواقع بخمس ولايات بالهند، بنحو ١٩٤٠ ميجاوات تقريبًا وكما يوضحها الجدول التالى:

جدول (١ – ١)

قائمة بالمفاعلات النووية (بالهند)

الموقع	عدد المفاعلات ونوعها	القدرة التقريبية بالميجاوات	سنة التوريد
فى التشغيل:			
١ – تارابور (١،٢)	٢ مفاعل – مولد	٣٢٠=١٦٠X٢	١٩٦٩
٢ – راوانبهاتا (١،٢)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	٣٠٠=٢٠٠+١٠٠	١٩٧٣، ١٩٨١
٣ – كالباكام (١،٢)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	٤٤٠=٢٢٠X ٢	١٩٨٣، ١٩٨٥
٤ – نارورا (١)، نارورا (٢)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	٤٤٠=٢٢٠X ٢	١٩٩٠، ١٩٩١
كاكرابار (١)، كاكرابار (٢)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	٤٤٠=٢٢٠X ٢	١٩٩٢، ١٩٩٥
		الإجمالى ١٩٤٠	
تحت الإنشاء:			
١ – كاكرابار (٣)، كاكرابار (٤)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	٤٤٠=٢٢٠X ٢	
٢ – راوانبهاتا (٣)، راوتبهاتا (٤)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	٤٤٠=٢٢٠X ٢	
٣ – كايجا (١)، كايجا (٢)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	٤٤٠=٢٢٠X ٢	
٤ – تارابور (٣)، تارابور (٤)	٢ مفاعل بالماء الثقيل المضغوط	١٠٠٠=٥٠٠X ٢	
مخطط إقامته:			
١ – كايجا (٣، ٤، ٥، ٦)	٤ مفاعل ماء ثقيل مضغوط	٨٨٠=٢٢٠X ٤	
٢ – راوانبهاتا (٥، ٦، ٧، ٨)	٤ مفاعل ماء ثقيل مضغوط	٢٠٠٠=٥٠٠X ٤	
٣ – كودانكولام (١، ٢)	٢ مفاعل VVER(*)	٢٠٠٠=١٠٠٠X ٢	
	المستهدف لعام ٢٠٢٠م: ٢٠٠٠٠ ميجاوات تقريبا		

(*) مفاعل VVER: هو اختصار لعبارة Vapour Vacuum Extraction Reactor (المترجم)

ولقد كان تشغيل المفاعل المولد التجريبي في كالباكام عام ١٩٨٥، بقدرة حرارية ٤٠ ميجاوات، وقدرة كهربية ١٣ ميجاوات مؤشرًا على بدء المرحلة الثانية في برنامج الهند للقوى النووية.

وفيما يتعلق بالمرحلة الثالثة، فقد تم إحراز تقدم طيب، تمثل في تصنيع الوقود الحامل (يو ٢٣٣) واختباره في منظومة مفاعل صغير، وهناك تحت الإنشاء منظومة متقدمة لمفاعل يعمل بالماء الثقيل ويمكنه الاستفادة الملائمة من دورة وقود الثوريوم / يو- ٢٣٣. وتقوم إستراتيجية الهند على المدى البعيد، على الاعتماد على مفاعلات الثوريوم للأسباب الآتية:

أ - يساعد الثوريوم المحول إلى يو -٢٣٣ على الحفاظ على استمرار الدورة دون مدخلات ذات بال من مواد انشطارية خارجية.

ب- إمكانات الطاقة للثوريوم في المفاعلات الحرارية تفوق تلك الخاصة باليورانيوم الطبيعي.

جـ- لدى الهند من الثوريوم عالي الجودة خمسة أضعاف ما لديها من اليورانيوم تقريبًا (هناك وفرة في الثوريوم تتيحها المصادر الطبيعية).

د- إمكانيات الثوريوم تتجاوز متطلبات المفاعلات السريعة.

تعدين مواد الطاقة النووية:

تتميز الهند بالثراء في بعض المواد الذرية والنووية المعدنية بعينها، حيث يجري الحصول على اليورانيوم من مناجم (جادوجودا) في مقاطعة سينجبهوم ببيهار، وكذلك من مواقع في راجستهان، ورمال المونازايت(*) الوفيرة على ساحل كيرالا هي مصدر رئيسي للثوريوم واليورانيوم.

كذلك يتواجد الإلمينايت والزركونيوم المركزان بالرمال الساحلية بمالابار وكوروماندال، ويتواجد الجرافيت في مادهيابراديش وتاميل نادو.

(*) المونازايت (Monazite) مادة خام تحوي عناصر الثوريوم والسيريوم واللنثانيوم (المترجم)

الطاقات غير التقليدية:

لدى الهند إمكانات عريضة من مصادر الطاقة المتجددة، وقد طور عدد من التقنيات فى سبيل استغلالها، فقد أقيمت عدة قواعد صناعية بالبلاد لتطبيق مختلف تقنيات الطاقة المتجددة، كالطاقة الشمسية الحرارية والطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح والمحطات المائية الصغيرة ومصادر الطاقة الحيوية وغيرها، وتبلغ القدرة المركبة الإجمالية لهذه التقنيات ٩٠٠ ميجاوات.

الخطة والسياسة:

بمقدور مصادر الطاقة غير التقليدية أن تحل مشكلتين متلازمتين من مشاكل التزويد بالطاقة: فهى من جهة تحقق اللامركزية فى الإمداد بها، ومن جهة أخرى تسهم فى المحافظة على نظافة البيئة، وتشجع الحكومة تنمية مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة لمجابهة الطلب المتزايد عليها، والوقوف كإضافة إلى جانب مصادر الطاقة التقليدية الآيلة للنفاد، وللوفاء باحتياجات المناطق الريفية.

وقد تأسست إدارة "مصادر الطاقة غير التقليدية **DNES** فى عام ١٩٨٢"، وتطورت فيما بعد بحيث أصبحت وزارة مستقلة ترعى شئون تطوير مصادر الطاقة الجديدة وغير التقليدية، وتتضمن نشاطاتها الرئيسية وضع برامج لتطوير الإفادة من الطاقة الشمسية وطاقات الرياح والمحيطات، والطاقة من الهيدروجين والمصادر الحيوية والكيميائية والطاقة من المخلفات والغاز الحيوى ومواقد "التشولها" **Chulha**(*)، وإعادة تدوير النفايات والطاقة المغناطيسية – الهيدروديناميكية وغيرها، وتولى برامج ومخططات الإفادة من مصادر الطاقة

(*) موقد التشولها (**Chulha**): موقد مصمم بحيث يحد من الأضرار الصحية نتيجة الطهى فى الأماكن الضيقة المغلقة (المترجم)

الجديدة والمتجددة عناية خاصة لاستثمار التعاون مع منظمات المجتمعات المحليــة وتلبية احتياجاتهم ذات الحجم المحدود من القدرة للأغــراض مــن قبيــل الطهــى والتزويد بالمياه لأغراض الرى المحدودة والشرب والاســتعمالات المنزليــة إلــى جانب إضاءة الطرقات، وقد أثبتت تلك البرامج فاعليتها بصفة خاصة فــى تــوفير نوع من الرفاهية للقطاعات المحرومة من المجتمع.

الطاقة الشمسية:

الطاقة الشمسية هى الآتية من الشمس فى صورة إشعاع، فالشمس مــصدر هائل للطاقة، ومما يعتقد أن ٠,١% فحسب من ٧٥٠٠٠ تريليون كيلووات ســاعة من طاقة الشمس التى تصل للأرض كافية للوفــاء باحتياجــات كوكــب الأرض، وبالوسع استغلال طاقة الشمس بثلاثة سبل:

أ – تحويلها إلى طاقة حرارية.

ب– تحويلها إلى كهرباء.

جـ– التمثيل الضوئى.

الطاقة الحرارية:

يمكن الحصول على الطاقة الحرارية باســــــــتخدام مجمع شمسى، ولقــد دخل عدد كبير من تطبيقات اســــــتغلال طاقــة الــشمس الحراريــة المــستوى التجارى، وخصوصًا تلك التى تلزمها طاقة حرارية محــــــــدودة. ويتضمن ذلك أجهزة الطهى، ومنظومات تسخين الماء شمسيًا، وتجفيف المحاصــيل الزراعيــة، والتبريد، وضخ المياه، والمعالجة الموسمية للخشب، وتحلية المـــــياه المالحــة، ويتواصل العمل حاليًا لتطوير مجمعات شمسية ذات جدوى اقتصادية فــى حــالات

تطبيقات درجات الحرارة العالية. والمنظومات الحرارية الشمسية هى اليوم إحدى الوسائل الإضافية عند مختلف درجات الحرارة بين ٦٠، ٣٨٠ °م للأغراض المنزلية والصناعية المتنوعة، بما فى ذلك عمليات التسخين الصناعية وتوليد القوى.

ولدى منظومات تسخين الماء بالشمس إمكانات عريضة لتوفير الكهرباء المستهلكة فى القطاعات المنزلية والتجارية، ولتوفير النفط المستهلك فى القطاع الصناعى من أجل التزويد بالماء الساخن، وقيد دراسة الحكومة فى الوقت الراهن اقتراح بإقامة مشروع للقوى الحرارية الشمسية بقدرة ٣٥ ميجاوات فى قرية مايتهانيا بجودهبار فى راجستهان.

ومركز الطاقة الشمسية التابع لوزارة "مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة" هو الجهة المحورية فى نشاط البحوث والتطوير، وتضم نشاطات المركز بحوثًا فى التسخين الشمسى، وتصميم المنظومات وتنفيذها، وتوليد القوى الحرارية من الطاقة الشمسية والمعمار الشمسى(*) وتقنية الدفيئة (الاحتباس الحرارى).

التأثير الشمسى الكهروضوئى:

فى المنظومات الشمسية الكهروضوئية تولد الكهرباء رأسًا من الطاقة الشمسية، حيث تعمل على أساس الظاهرة الكهروضوئية، فعندما يسقط الضوء على مواد معينة مثل السليكون، تستثار الإلكترونات وتفر من المعدن، وتتجمع هذه الإلكترونات لدى معدن آخر – عبر الأسلاك – فى شكل تيار منتظم، وفيض الإلكترونات المتولدة بهذه الكيفية يكون تيارًا كهربيًا، والوحدة الأساسية فى

(*) يقصد به مراعاة المتغيرات الشمسية عند تصميم المنزل معماريًا بحيث تتوفر الراحة داخله طوال النهار وتستغل الطاقة الشمسية فى التدفئة من غير ما حاجة لأجهزة ميكانيكية (المترجم)

المنظومة الشمسية الكهروضوئية هى الخلية الشمسية، وهى عبارة عن مجموعة رقائق من معدن باعث للإلكترونات.

وهيئة مصادر الطاقة غير التقليدية DNES هى المنوط بها تطوير الأجهزة الشمسية الكهروضوئية وإنتاجها وتطبيقات استخدامها، ومنذ ١٩٧٨، عندما انطلق أول برنامج للبحوث والتطوير فى مجال المنظومات الكهروضوئية من خلال شركة الإلكترونيات المركزية المحدودة (بجازياباد)، تم إحراز تقدم ملموس فى هذا المجال، وخلال الفترة من ١٩٨٥ – ٩٠، تم إنتاج منظومات الكهرباء الشمسية على نطاق تجارى فى الشركة المركزية المحدودة للإلكترونيات فى جازياباد، وفى شركة راجستهان المحدودة للأدوات الإلكترونية فى جايبور، كما بدأت بالفعل عمليات كهربة قرى بعيدة، حيث كانت قرية "ساليجيبالى" فى أندرابراديش أول قرية فى البلاد جرت كهربتها باستخدام المنظومات الكهروضوئية الشمسية، ولقد تم بالفعل توريد أول مشروعين للقوى من المنظومات الشمسية الكهروضوئية، ودمجهما جزئيًا بالشبكة بقدرة ١٠٠ كيلووات لكل منهما، فى (كاليانبور) بمقاطعة (أليجاره)، و(سارايسادى) فى مقاطعة (ماو) بأوتار براديش.

وتستعمل المنظومات الشمسية الكهروضوئية فى الهند حاليًا فى تزويد المناطق الريفية والقاصية التى لم تدخلها شبكة الكهرباء فى الاستخدامات المتعددة التى تلزمها قدرات محدودة مثل الإنارة، وضخ المياه وتشغيل إشارات السكك الحديدية وفى منظومات شبكات الاتصال الريفية، وفى تنقية المياه لأغراض الشرب والرى ومحطات إعادة بث الموجات الميكرونية، وإمداد المعدات الإلكترونية بالطاقة بالمنصات المنصوبة على مبعدة من الشاطئ، وخطوط أنابيب النفط والغاز وفى خطوط نقل الإرسال التليفزيونى، ولهذه الطريقة فى استغلال الطاقة الشمسية جاذبيتها باعتبار ظروف الإشعاع الشمسى المواتية، والاحتياجات الضخمة للكهرباء فى التطبيقات اللامركزية، وتتميز المنظومات الكهروضوئية

بسهولة إقامتها وصيانتها، وخلوها من الضوضاء والتلوث، وطول عمرهـــا. معـــا يزكى استعمالها فى المناطق النائية أو المنعزلة، والغابات والمناطق التى بها تـــلال وعرة وفى الصحارى.

والأمر الرئيسى الوحيد الذى يحد مـــن انتـــشار المنظومـــات الشمـــسية – الكهروضوئية، هو ارتفاع الاستثمارات الابتدائية، وأهم المكونـــات المكلفـــة هـــى رقائق السليكون والتى يتم – جزئيًا – استيرادها، ومن حسن الحظ أن شركة ميتكم المحدودة للسليكون (ضمن مجموعة تشيمبلاست) بالتعاون مع معهد (بانـــجالور)، قد نجحت فى إنتاج السليكون المتبلر محليًا، وفى تطوير عملية إنتاج غاز الـــسيلين Silane gas(*)، وهو مادة جديدة للسليكون غيـــر المتبلـــر، كمـــا بـــدأت شـــركة سوريوفونيكس المحدودة بحيدرأباد فى إنتاج السليكون غير المتبلر، ولقـــد جـــرى بالفعل توريد مصنع – على مقياس تجريبى – بنظام تحكم آلى شامل لإنتاج نماذج من المنظومات الكهروضوئية الشمسية التى تعمل بالسليكون غير المتبلر المحتوى على طبقة سفلية من الزجاج، فى جورجاون سنة ١٩٩٢.

التمثيل الضوئى:

التمثيل الضوئى هو ظاهرة التحول الكيميائى لثانى أكسيد الكربون والمـــاء إلى كربوهيدرات فى وجود ضوء الشمس ومادة الكلوروفيـــل (اليخـــضور) فـــى النبات، وهو أحد أعلى الوسائل كفاءة فى الطبيعة لتحويل طاقة الشمس إلى صورة صالحة للتخزين، لقد ثبت أن نسبة تصل إلى ٣٠% من الـــضوء الممـــتص فـــى الطحالب ورتب النباتات الأعلى – وذلك فى ظل ظروف موائيـــة وعبـــر فتـــرات زمنية قصيرة ومع شدة إضاءة منخفضة نسبيًا – تتحول إلى طاقة كيميائية.

(*) غاز السيلين Silane gas: هو غاز عديم اللون قابل للاحتراق مكون من السليكون والهيدروجين رمـــزه الكيميائى س يد٤ Si H4 (المترجم)

الطاقة الحيوية:

ويقصد بها الطاقة المنتجة فى الكيانات الحيوية، وتنتج الطاقة الحيوية إما مباشرة باستعمال المصادر الحيوية، أو بتحويل الطاقة إلى صورة وقود غازى أو سائل (ويشمل ذلك الغاز الحيوى **Biogas**).

مصادر الطاقة الحيوية:

تحتل مصادر الطاقة الحيوية مكانا بارزًا كمصدر للطاقة بمناطق الهند الريفية، ويعرف مصدر الطاقة الحيوى **Biomass** بأنه مادة حية أو مخلفات منها، وهى مصدر متجدد للطاقة، والمثل الدارج للمصادر الحيوية: الخشب والأعشاب والحشائش والحبوب وثفل (أى مصاصة) سكر القصب، وما إلى ذلك، ويمكن تصنيف مصادر الطاقة الحيوية الرئيسية إلى مجموعتين:

١) نفايات مادية تشمل تلك المواد المتخلفة عن الزراعة، والحراجة[*] والنفايات من المرافق المحلية.

٢) محاصيل تزرع بغرض إنتاج الطاقة وتشمل زراعات غابية قصيرة الدورة.

وفى إطار برنامج استغلال المصادر الحيوية، بدأت عملية استزراع نوعيات من النباتات والأشجار سريعة النمو ذات دورة قصيرة الأمد وذات قيم حرارية مرتفعة للوفاء بالاحتياجات من الوقود والأعلاف والقوى المحركة، وتسمى هذه العملية "بالاستزراع بغرض الطاقة" **Energy Plantation**.

(*) الحراجة Forestry: هى علم وفن زراعة ورعاية وتطوير الغابات (المترجم)

وللاستزراع فى المناطق الماحلة – إلى جانب ما يوفره من طاقــة – فائــدة تحسين خصوبة التربة وتقليص تآكلها.

ولتوليد القوى المحركة من المصادر الحيويــة جــرى تطــوير منظومــات تحويلها إلى غاز وآلات تقليبها محليًا.

وتحول هذه الأجهزة نفايات الكيانات الحيوية والبقايا الزراعية إلى طاقة من خلال تحويلها لغاز أو إحراقها. ومصادر الطاقة الحيوية تستعمل بالمثل فى إنتــاج الوقود السائل لتسهيل نقله كالإيثانول والميثانول، والوقود الصلب عن طريق تحويل النفايات الزراعيــة إلــى مكــورات **Pellcts** وقويلبــات **Briquettes**. والزيــوت الخضرية، ذات القيمة الحرارية العالية وخواص الاشتعال التى تقــارب خــواص زيت الديزل يمكنها أن تحل كبديل، أو إضافة مكملة له، على أن للزيوت الخضرية لزوجة مرتفعة ومخلفات كربونية تؤدى إلى صعوبات فى ضخها وتبخيرهــا فــى الآلات، وإلى انبعاث أدخنة كثيفة فى جهة العادم، وللتغلب على هذه العقبات اتبــع معهد بحوث مدراس **IIT** مدخلين مختلفين:

أ – تحوير آلة الديزل بحيث تصبح أكثر أديباتية(*).

ب– أسترة(**) الزيوت الخضرية بالميثانول أو الإيثانول.

ويعكف معهد دلهى للبحوث على الاستغلال الأمثل للغاز المنــتج فــى آلات الاحتراق.

(*) العملية الأديباتية **adiabatic** فى الديناميكا الحرارية هى العملية التــى لا يــصحبها انتقــال للحــرارة (المترجم)

(**) الأسترة **esterification** هو تحويل المادة إلى مركبات عضوية مماثلــة للأمــلاح غيــر العــضوية والمتشكلة من حمض عضوى وكحول (المترجم)

ولقد أنشئت سبعة مراكز لبحوث الطاقة الحيوية تحت الظروف المناخية والزراعية المتباينة بالبلاد لدعم التطوير فى هذا المجال.

ولقد اتخذت الهند الخطوات الآتية لاستخلاص الطاقة من المصادر الحيوية:

- إقامة محطة حرارية بقدرة ١٠ ميجاوات تستغل قش الأرز – وهى الأولى من نوعها – وتم توريدها بمعرفة هيئة **BHEL** فى جهالكهارى بالبنجاب.
- بدأ فى بومباى التشغيل التجريبى لأول مصنع – على المقياس الكبير – لإنتاج مكورات الوقود من نفايات المرافق المحلية.
- أقيمت فى بورت بلير محطة تحويل المخلفات لغاز بقدرة ١٠٠ كيلو وات، ويجرى حاليًا تقييم ميدانى لمشروع لمنظومة بقدرة ١٥ كيلووات باستغلال الماء وسكر القصب.

الغاز الحيوى:

الغاز الحيوى مصدر مستديم للطاقة، بفضل الحصول على المخلفات العضوية الطبيعية التى تنتشر على نطاق واسع، وبفضل سهولة تشييد وحدات إنتاجه وتشغيلها وصيانتها للفوائد المتعددة التى تعود منها على الدولة والمستهلكين على حد سواء.

والغاز الحيوى هو مزيج غازى (بتركيبات متفاوتة) وإن كان يتكون بصفة عامة من الميثان بنسبة ٦٠% (وهو وقود ذو قيمة حرارية عالية)، ٤٠% من ثانى أكسيد الكربون (وهو غاز خامل) إلى جانب نسب طفيفة من غازات أخرى كالنيتروجين وكبريتيد الهيدروجين، ويتكون من التخمر اللاهوائى (وهو عملية حيوية) للمخلفات العضوية الطبيعية.

وإما أن تكون هذه المخلفات العضوية:

أ – روث الأبقار وإفرازات الحيوانات الأخرى.

ب– أو إفرازات بشرية إخراجية (غائط).

جـ – نفايات زراعية مثل القش والنباتات وأوراقها والطحالب ومصاصة قصب السكر والقشور الخارجية للثمار والبذور، والحشائش المائية... إلخ.

د – النفايات الصناعية المحتوية على مواد سليولوزية مثل الأوحال المترسبة بأحواض تقطير المياه، ونفايات مدابغ الجلود، والصناعات الغذائية ومصانع الورق وما إلى ذلك.

ويشيع إنتاج الغاز الحيوى فى المعتاد من روث الماشية فى مصانع الغاز الحيوى المعروفة باسم **gobar gas plant**(*) من خلال عملية تحلل المواد العضوية بفعل البكتريا (التخمر اللاهوائى).

ومع انبعاث الغاز الحيوى لا تقل قيمة الروث لاستعماله كسماد. بل إن المادة الطينية الخارجة من مصنع الغاز الحيوى هى بمثابة سماد تم إثراؤه، لمحتواه العالى من الأكسجين والفسفور والبوتاسيوم، وطبقا لذلك تساعد مثل هذه المصانع على توفير كل من الوقود والسماد العضوى من نفس المادة، وهى روث الماشية.

ويمثل الغاز الحيوى وقودًا نظيفًا ورخيصًا يصلح لمتطلبات الطهى، كما يمكن استعماله لأغراض الإنارة، وإدارة المحركات الصغيرة بالقدرة اللازمة للصناعات القروية الصغيرة، وهناك العديد من المميزات التى تتوفر للأسر الريفية إذا ما اتبعت تقنية الغاز الحيوى، فهى تكفى النساء والأطفال مئونة جمع أخشاب

(*) **Gobar**: كلمة هندية تعنى روث البقر (المترجم)

الوقود، وحمل حزمه الثقيلة على الرءوس، والتخلص من الأدخنة المتصاعدة التـــى هى جزء أصيل فى مواقد التشولها Chulhas التقليدية، تلك التـــى تـــؤذى الأعـــين وتجلب أمراض الرئة، علاوة على توفير الكثير من الوقت المنقضى فـــى الطهـــى وتنظيف أوعيته وأدواته والاستغناء عن قطع الأشجار من أجل توفير الوقـــود، وإذا ما ألحقت مراحيض (مباول) بهذه المصانع فإنها تساعد على الصرف الصحى من القرى أيضًا.

وما يجعل مثل هذه الوحدة ذات جدوى اقتصادية، هـــو أن التـــدفق النقـــدى المستفاد يتمثل فى توفير خشب الوقود، وإنتاج السماد العـــضوى الغنـــى بمحتـــواه المرتفع من الأكسجين والفسفور والبوتاسيوم واستغلاله فى الزراعة.

لقد طور العلماء كذلك مصانع الغاز الحيوى، بحيث يتيسر تـــشغيلها بمـــواد متنوعة مثل الغائط البشرى وزنابق الماء والمخلفات الزراعية، وبقايا الخروع بعد نزع الزيت منه ونشارة خشب الصفصاف وبقايا المواد الغذائية.

ووزارة "مصادر الطاقة غير التقليدية" ماضية فى تنفيذ المـــشروع القـــومى لتطوير استغلال الغاز الحيوى الذى بدأ فى الفتـــرة مـــن ١٩٨١ – ٩٢، كخطـــة مركزية ترعاها الدولة.

الطاقة من المحيطات:

يمكن استغلال المحيطات أو البحار فى الحـــصول علـــى الطاقـــة بثمانيـــة أساليب:

تحويل طاقة المحيطات لحرارة:

لدى الهند رصيد هائل من إمكانية تحويل طاقة المحيطات حراريًـــا، يـــصل مقدارها لزهاء ٥٠٠٠٠ ميجاوات، ويقع واحد من أفضل المواقع فى العالم لتحويل

طاقة المحيطات حراريًا خارج أراضى الهند الرئيسية علـى مقربـة مـن جـزر لاكشادويب وأندامان ونيكوبار، ولقد أقيمت خلية لطاقـة المحيطـات عنـد معهـد البحوث بمدراس لمواكبة التطورات العالمية فى ذلك المـضمار، وتطـور شـركة أمريكية، هى **Sea Solar Power Inc.**، الإفادة مـن التحويـل الحـرارى لطاقـة المحيطات، وأول محطة فى العالم مقترح إقامتها على مبعدة من ساحل تاميل نادو، بقوة محركة مقدارها ١٠٠ ميجاوات.

ويفيد تحويل طاقة المحيطات حراريًا من فرق درجات الحرارة ما بين سطح البحر، وعلى عمق ١٠٠٠ م منه أو تزيد، فى استخراج الطاقة، وتستعمل القـدرة الناتجة فى إدارة توربينات توليد الكهرباء، وفى بلاد المناطق الاستوائية – كالهنـد – يصل منحدر درجات الحرارة إلى حوالى ٢٥ °م والعقبة الرئيسية فـى تحويـل طاقة المحيط الحرارية هو عامل التكلفة، وصعوبة التشغيل وانخفاض الكفاءة.

طاقة الأمواج:

تسخر طاقة الأمواج، والتى تتمثل فى حركتها الدائبة ارتفاعًا وانخفاضًا، فى تشغيل توربينات مائية أو – وهو الأفضل – توربينات هوائية فى توليد الكهربـاء، وإمكانيات طاقة الأمواج على امتداد سواحل الهند التى يصل طولهـا إلـى ٦٠٠٠ كيلو متر تقدر بنحو ٤٠٠٠٠ ميجاوات، وتمثل أحزمة الرياح التجارية فـى بحـر العرب وخليج البنغال أماكن نموذجية لاقتناص طاقة الأمواج.

والقدرة المولدة من الأمواج متجددة ولا تسبب تلوثًا، بيد أنها باهظة التكاليف (روبية هندية لكل وحدة)(*).

وتقوم أول محطة قوى هندية لاستغلال طاقة الأمواج بطاقة ١٥٠ كيلووات (كحد أقصى)، على فكرة عمود الماء المتذبـذب **Oscillating water column**،

(*) تعادل الروبية الهندية حوالى ٧،١ سنت أمريكى وقت صدور الكتاب (المترجم)

وقد تم توريدها فى فجينجام بواسطة معهد البحوث بمـدراس، وقـد أعلنـت إدارة "تطوير طاقة المحيطات" أن محطة قوى فجينجام هى ثروة قومية لدراسات طاقـة الأمواج وتطبيقات استخدامها، هذا وقد طورت هيئة سويدية هى (Sea Power AB)، تقنية تسخير طاقة الأمواج بموجب مفهوم (قوى الأمواج الطافية Floating wave power)[*]، وتسخير طاقة الأمواج وفقا لهذا المبدأ يتم بحثه فى الهند، حيث يجرى إنشاء محطة قوى بقدرة ١ ميجاوات حاليا فى جزر أندامان ونيكوبار.

طاقات موجات المد والجزر:

إن تيارات المد والجزر المنتظمة والناجمة عن الشد الجـذبوى لكـل مـن الشمس والقمر لها فائدتها فى توليد الكهرباء، وبوجه خـاص حيـث يبلـغ مـدى الموجات (وهو الفرق ما بين المد العالى والجزر المنخفض) قدرًا كبيرًا، وإذا مـا أتيح مستودع مياه مناسب، طبيعيًا كان أو صناعيًا، فبالمقدور توليد القدرة بـإمرار موجات المد والجزر عبر توربينات، وإمكانيات طاقة موجات المد والجزر بالهنـد تقدر بزهاء ٨٠٠٠ إلى ٩٠٠٠ ميجاوات، والمواقع الصالحة المتعارف عليها هـى خليج كومباى (٧٠٠ ميجاوات)، وخليج كوتش (١٠٠٠ ميجـاوات)، وسـوندريان (١٠٠ ميجاوات)، ومن المقترح تشييد أول محطة قوى بموجات المد والجزر بآسيا بقدرة ٩٠٠ ميجاوات فى (كاندلا) بخليج كوتش.

طاقة التيارات المائية:

بالوسع – نظريًا – استعمال تيارات المحيط المتحركة فـى توليـد الطاقـة بالسماح للمياه بالمرور عبر سلسلة من التوربينات المركبة أسفل الماء، إلا أن كثافة الطاقة التى يتيسر استغلالها ضئيلة، كما أن تثبيت التوربينات فى مواضـعها هـو الذى يمثل المشكلة الأكبر.

(*) يعنى محطة قوى لتحويل طاقة الأمواج لكهرباء (المترجم)

طاقة رياح المحيطات:

الرياح التى تهب على المناطق الساحلية أقوى وأكثر انتظامًا – نسبيا – من رياح المناطق البرية، ويمكن تسخيرها كمصدر للطاقة، وتقوم كثير من البلدان بتوليد الطاقة من هذا المصدر، وتتلخص المشاكل التى ترتبط بمناطق الرياح التجارية فى التثلج icing، وهبوب الأعاصير(*).

الطاقة المستمدة من منحدر درجة الملوحة Salinity gradient.

إذا وضع غشاء شبه منفذ ما بين وسطين مائيين مختلفين فى درجة تركز الملوحة، فسيبدأ الماء ذو الملوحة الأقل فى التسرب خلال الغشاء صوب الجهة ذات الملوحة الأعلى إلى أن تتعادل درجة التركيز فى الجانبين.

ويطلق على هذه الظاهرة (التناضح) أو (التنافذ الغشائى) **Osmosis**، ويمكن توليد تيار كهربى من خلال هذه الحركة الأزموزية، وهناك نموذج نصف صناعى فى السويد يجرى تشييده لتوليد قدرة مقدارها ٢٣٠٠ ميجاوات اعتمادًا على الطاقة المستمرة من اختلاف درجة الملوحة.

طاقة الأرض الحرارية بالمحيطات:

تستعمل هذه الطريقة – من الناحية النظرية – تدرج درجات الحرارة (كما فى حالة تحويل طاقة المحيطات حراريًا)، ولكن بأسلوب معاكس، حيث تكون درجة حرارة القشرة الأرضية منخفضة عن درجة الحرارة العالية فى باطنها، بيد أن هذه الطريقة لم يتم تطبيقها بعد على نحو عملى.

(*) يطلق لفظ الإعصار **hurricane** على الرياح التى تتجاوز سرعتها ١١٩ كيلو مترًا فى الساعة (المترجم)

طاقة التحول الحيوى:

يمكن بالمثل تحويل الأعشاب البحرية إلى وقود وإلى مصادر طاقة أخرى كالميثان، والأغذية، والأسمدة.

طاقة الرياح:

تبرز الرياح كواحدة من أهم مصادر الطاقة البديلة ذات الإمكانيات الضخمة والقادرة على المساعدة – إلى حد بعيد – على عبور الفجوة بين الاحتياجات من الطاقة والمعروض منها، فللرياح طاقة حركة عائدة إلى تحرك كتل هوائية ضخمة نتيجة للتفاوت فى معدلات تسخين الشمس لطبقات الجو، وباستطاعتنا استغلال تلك الطاقة لبذل شغل ميكانيكى وكهربى، ويمكن استعمال توربينات الرياح فى توليد الكهرباء، ورفع المياه من الآبار، وفى الضخ المباشر للمياه.

وتشير تقديرات إمكانيات طاقة الرياح بالهند إلى رقم ٢٠٠٠٠ ميجاوات، ولقد تم حتى عام ١٩٩٥ – ٩٦ إقامة قدرات يبلغ إجماليها ٧٣٢ ميجاوات، والأماكن المحبذة لتشييد محطات قوى بالرياح هى المناطق الساحلية فى تاميل نادو، وجوجارات، وأندرابراديش وماهاراشترا. ولقد تطور توليد القدرة من الرياح بالهند سواء فى النماذج المفردة القائمة بذاتها **Stand alone modes** مع وجود محركات ديزل احتياطية ومخزون مسبق بالضخ لضمان استمرارية الإمداد فى حالة ضعف الرياح، أو فى مزارع الرياح التى تحوى صفوفًا من التوربينات التى تمد الشبكة بعصب احتياجاتها، ويقع أول مشروع لمزارع الرياح الآسيوية فى "ماندفى" بمقاطعة كوتش بولاية جوجارات، وأكبر تجمع لمزارع الرياح المجمعة بطاقة ١٥٠ ميجاوات يقع فى موباندال بتاميل نادو.

طاقة الأرض الحرارية:

طاقة جوف الأرض الحرارية هى تلك الطاقة الناتجة من العمليات الطبيعية التى تحدث بباطن الأرض، والمصدر الرئيسى لهذه الطاقة (والتى تكون فى صورة حرارة) هو الصخور والصهارة الموجودة تحت سطح الأرض، وتسخر طاقة الأرض الحرارية لأغراض التسخين وتوليد القوى من البخار الطبيعى أو الماء الساخن أو الصخور الجافة بالقشرة الأرضية، ويضخ الماء عبر بئر حقن إلى أسفل حيث يمر خلال ثغرات بين الصخور الحارة، ومن ثم يصعد الماء إلى السطح من خلال بئر استعادة **Recovery well**، وقد يحول هذا الماء إلى بخار فى مبادل حرارى، كما قد يمرر البخار الجاف خلال توربينات لتوليد الكهرباء، ويتيح نحو ١٠% من مساحة سطح الأرض الوصول إلى مصادر الحرارة بجوفها، وأكثر المصادر كفاءة هى البراكين والينابيع الحارة، غير أن هناك مناطق أخرى بالمثل يمكن استخلاص الحرارة منها تحت ظروف يتم التحكم فيها.

وهناك بالهند ٣٤٠ موقعًا للينابيع الحارة ذات درجة حرارة متوسطة بين ٨٠، ١٠٠ °م تم التعرف عليها كمصدر متاح للطاقة الحرارية الأرضية، ويجرى العمل على قدم وساق فى نواح عديدة من الهند لمسح حرارى شامل لباطن الأرض لتقييم إمكانية استغلال طاقة الأرض الحرارية فى التسخين المباشر وفى توليد القوى المحركة، ولقد تم بالفعل توريد محطة توليد نصف صناعية قدرتها ٥ كيلووات بما نيكاران بمقاطعة كوللو – ولاية هيماتشال براديش، كما تم تقييم دراسة محطة قوى لطاقة الأرض الحرارية قدرتها ٤ – ٥ ميجاوات فى وادى بوجابلاداكه فى جامو وكشمير.

وقد تم التأكد من إمكانية استخدام طاقة الأرض الحرارية فى أغراض تدفئة المنازل وإحداث احتباس حرارى (دفيئة). وقيد التنفيذ فى مختبرات البحوث الإقليمية بجامو، مشروع لزراعة فطر عيش الغراب، وإنشاء مزرعة دواجن باستخدام موائع تستغل طاقة الأرض الحرارية، وستقام وحدة الاحتباس الحرارى اللازمة للمشروع بوادى باجو على أساس الإفادة من البئر التى سبق حفرها لاستعمال طاقة الأرض الحرارية.

القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية:

يقوم توليد القدرة المحركة من القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية على أساس تحويل الطاقة الحرارية رأسًا إلى كهرباء، مقارنة بمحطات القوى التقليدية التى تتحول فيها الطاقة الحرارية أولا إلى طاقة ميكانيكية تحول بدورها إلى طاقة كهربية، ويتضمن توليد القوى المحركة من الطاقة الحرارية باستخدام القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية، تمدد غاز شديد السخونة (٢٨٠٠° كلفن) وموصل كهربيًا فى مواجهة قوة مجال مغناطيسى قوى معاوقة لإنتاج القدرة الكهربية مباشرة، ومن ثم ففى المغناطيسية الهيدروديناميكية يندمج التوربين والمولد الكهربائى معًا فى وحدة واحدة لا تحتوى على أية أجزاء متحركة.

ولقد دعمت هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية **DNES** مشروعًا بحثيًا للقوى المغناطيسية الهيدروديناميكية على أساس الفحم بالهند، يهدف إلى إقامة قاعدة ملائمة لأعمال البحث والتطوير لتوليد القدرة عن هذا الطريق بتشييد محطة حرارية بقدرة ٥ ميجاوات، وتمضى البحوث قدما لتصميم محطة أكبر للقدرة المغناطيسية الهيدروديناميكية لتوليد قدرة أنظف وأزهد تكلفة، وتعمل بكفاءة أعلى من محطات الفحم والمحطات النووية القائمة، ومن أجل إنجاز هذا الهدف يتم

تجميع البيانات من محطة قوى مغناطيسية هيدروديناميكية علـــى مقيـــاس صــــغير مقامة فى "تيروشيرابالى" بتاميل نادو.

الطاقة من الحيوان (الحيوانات كمصدر للطاقة):

تسهم طاقة الحيوان (drought animal power) بحوالى ٥٠% من إجمالى الطاقة المولدة بالبلاد، وتستعمل أساسًا فى أغراض الزراعة والنقل، وقد وضـــعت هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية برنامجًا قوميًا فى هذا المجال فى مارس من عام ١٩٩٤، وفى إطار هذا البرنامج يجرى تطوير المعدات والأجهزة ومركبات النقـــل التى يجرها الحيوان، كما تنفذ برامج لتحسين استغلال الطاقة البشرية فـــى النقـــل بالركشا(*) والدراجات وعربات اليد، بالإضافة إلى تحسين وترقية تصميم المعـــدات التى تدار بالقوى العضلية للعمال المعدمين والحرفيين المهرة.

الطاقة من المخلفات الصناعية ونفايات المناطق الحضرية:

تطلق فى البيئة بالهند كميات ضخمة من مخلفات الصناعة ونفايات المرافق العامة والمناطق الحضرية، دونما معالجة أو بعد معالجة محدودة، مما يفضى إلى تلوث البيئة، وتتحلل النفايات الملقاة فى البيئة تحللاً عضويًا، مطلقة غاز الميثان فى الجو، وبالإمكان استغلال هذه المخلفات كمصدر هائل للطاقة، ومن ثم المعاونة فى تقليل انبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحرارى وتقليص التلـــوث البيئـــى للحـــد الأدنى، بهدف الوصول إلى أقصى فائدة بيئية بالاستغلال القويم للمخلفات المتنوعة التى تتســـبب حـــتى الآن فى مشاكل التلوث، وقد انطلق برنامـــج قومـــــى منـــذ

(*) الركشا rickshaw عربة ذات عجلتين يدفعها رجل أو اثنان ينتشر استخدامها بالهند (المترجم)

يونيو ١٩٩٥ للمعالجة السليمة للمخلفات الصناعية والحضرية واستعادة الطاقة من هذه المصادر، وأقيم فى دلهى مصنع لحرق مخلفات المناطق الحضرية الصلبة وتحويل الحرارة إلى كهرباء بطاقة ٣٠٠ طن من نفايات المرافق الصلبة يوميًا، وهناك مشروع قائم على عملية التحلل بالحرارة **Pyrolysis** لاستخلاص الوقود السائل من النفايات الصلبة مقترح إقامته فى بومباى، وقيد التنفيذ عدة مشروعات ستولد فيها القوة المحركة من مصاصة القصب بمصانعه بالبلاد.

وتسعى هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية لتطوير بدائل لمحركات الديزل والمحاليل الكحولية من أجل تقليل الاستهلاك منها نظرا لمحدودية المقادير الاحتياطية منها، وبالتالى تحجيم التدفق من العملات الأجنبية الصعبة إلى الخارج، وتتلخص هذه البدائل فى:

الغاز الطبيعى المضغوط:

للإفادة من الغاز الطبيعى المضغوط كوقود للمركبات، فإنه يضغط إلى ١٦٠ – ٢٠٠ ضعف الضغط الجوى ويخزن فى أسطوانات يمكن وضعها فوق سطح المركبة، وفى المركبات التى تستعمل البترول حيث يتم الإشعال بالشرارة **Spark ignition** يركب جهاز للتبديل إلى نظام الغاز، ويسمح هذا المبدل للغاز بالتمدد بواسطة صمام تقليل ضغط يخفضه إلى ما دون الضغط الجوى ثم يغذيه إلى آلة الاحتراق من خلال صمام تحكم يؤدى بالغاز إلى غرفة إحراق تعمل بدواسة سريعة، ويشتعل خليط الغاز الطبيعى المضغوط والهواء فى السيارات عن طريق شموع الاحتراق **Spark plugs**، أما فى آلات الديزل فيحدث الإشعال عن طريق حقن جرعات ضئيلة من الوقود.

ويستعمل زيت الديزل فى فترات بدء الحركة أو دوران الآلة بدون حمل، وتعمل منظومة الغاز الطبيعى المضغوط تلقائيًا بمجرد بدء المركبة فى الحركة، ويتميز

استعمال الغاز الطبيعي المضغوط بانخفاض وهج الغاز وانعـدام الانبعاثـات الـضارة وبالاقتصاد فى الطاقة، وتكمن المشكلة فى عبء وزن أسطوانة الغاز الإضافى.

لقد تم التأكد من الجدوى الفنية من استعمال الغاز الطبيعـى المـضغوط – كوقود – فى إيطاليا والأرجنتين ودول CIS(*) ونيوزيلندا والولايات المتحدة وكندا، وفى الهند تجرى المركبات التى تعمل به فى جوجـارات وتاميـل نـادو وأسـام وتريبورا، ومنذ ديسمبر ١٩٩٢ يستعمل الغاز الطبيعى المضغوط فى بومباى فـى تسيير حافلات النقل العام وسيارات الأجرة وبعض مركبات "الركشا" ضمن إطـار برنامج تحسين البيئة على المستوى العالمى والتابع للمصرف الدولى.

وفى دلهى تجرى بعض وحدات أسطول لـ DTC(**) هى الأخرى بالغـاز الطبيعى المضغوط.

ولدى هيئة GAIL(***) مشروع لتحويل ٦٣٩٢٠ سـيارة تعمـل بـالوقود البترولى السائل إلى العمل بالغاز فى غضون ٦ سـنوات، فـى دلهـى وبومبـاى وبارودا، وقد أنشئت بالفعل ثلاث محطات للضواغط فى تلك المدن، وتتولى هيئـة IBP تنفيذ المشروع فى أسام وتريبورا.

ومن شأن استعمال الغاز الطبيعى المضغوط فـى حـافلات النقـل العـام والشاحنات أن يوفر نحو ٥٠% من وقود الديزل، ولن تحـتاج الـسـيارات لأى وقود سائل على الإطلاق، والسيارة المزودة بأسطوانتى غاز طبيعى مضغوط إلى ٢٠٠ ضغط جوى قادرة على قطع مسافة ١٠٠ كيلو متر، وحافلات النقل العام والشاحنات المزودة بست أسطوانات يمكنها قطع مسافة ٣٠٠ كيلو متر، وإذا ما نفد

(*) منظمة تضم الدول التى كانت تتبع الاتحاد السوفيتى السابق (المترجم)

(**) اختصارًا لعبارة Delhi transport corporation (المترجم)

(***) اختصارًا لعبارة Gas Authority of India (المترجم)

الوقود من الغاز الطبيعى المضغوط على الطريق، يمكن للمركبة أن تسير بالوقود التقليدى المعتاد بالتحول عن نظام الغاز الطبيعى إليه.

الهيدروجين:

الهيدروجين وقود متجدد، فمادته الأولية (الماء) جد متوفرة، والطاقة الشمسية المبذولة فى تحليل الماء للحصول على الهيدروجين متاحة هى الأخرى لملايين السنين القادمة، وعلاوة على ذلك، لا يسبب الهيدروجين فى استخدامه كوقود أى تلوث، بل إنه ينتج الماء وهذا بمثابة تجديد لمادته الأولية، ومن ثم فإن الهيدروجين مصدر للطاقة صديق للبيئة ومصدر متجدد غير تقليدى لها، ومن أجل الوصول لهذا الهدف تطبق ذات القاعدة التى تستخدمها النباتات الخضراء فى عملية التمثيل الضوئى، ففى هذه العملية ينقسم جزىء الماء إلى أكسجين وإلكترونات وأيونات هيدروجين (يد+) ويمكن أن تتحول أيونات الهيدروجين هذه إلى هيدروجين غازى (يد٢) بالمقدور استعماله كوقود.

الوقود الغازى الكحولى Gasohol:

وهو مزيج من الجازولين والكحول الإيثيلى يستعمل كوقود للمحركات دونما حاجة إلى تغيير تصميم الآلة المحركة.

الهيدروكربونات:

بالوسع استعمال المركبات الهيدروكربونية التى تنتجها بعض الكائنات الحية الدقيقة فى صورة وقود سائل أو غازى، فعلى سبيل المثال هناك غاز الميثان الذى تنتجه الميكروبات من البوليمرات كالكاربوهيدرات والبروتين والشحوم والدهون وما إلى ذلك، وتنتج الهيدروكربونات بالمثل الطحالب وحيدة الخلية من نوع **Botryococcus Braunii** التى تصل نسبة الهيدروكربون فيها إلى ٧٥% من وزنها الجاف، وهى أعلى نسبة تم التعرف عليها فى أى نوع من الكيانات الحيوية.

الباب الثانى

الخلية الشمسية

مقدمـــة:

بالنظر إلى محدودية الاحتياطيات من الوقود الأحفورى والنووى، ستلعب المصادر المتجددة دورًا رئيسيًا فى إمدادات العالم المستقبلية من الطاقة، ومن بين مصادر الطاقة الجديدة المأمولة يمثل التحويل المباشر لضوء الشمس إلى كهرباء بديلا مبشرًا وواعدًا، وتزود الخلايا الشمسية بالطاقة من خلال منظومات تتراوح مستويات قدراتها ما بين المللى وات والميجاوات.

وتعتمد الخلايا الشمسية فى عملها على التأثير الكهروضوئى **Photovoltaic effect**، إذ تعمل الخلايا الشمسية على تحويل ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء، مستخدمة الخواص الإلكترونية لفئة من المواد تعرف بأشباه الموصلات (**Semiconductors**)، ومن الأسباب التى تدعو إلى الاهتمام العام على مستوى العالم بالاستثمار فى البحوث فى مجال التأثير الكهربى الضوئى:

أ- مخزونها الهائل من الطاقة على المدى الطويل، فى كل مكان – تقريبًا على سطح الأرض.

ب- نظرًا للطبيعة الريفية والصناعات الزراعية التى تسود فى البلاد النامية يمثل الحصول على الكهرباء من الشمس مدخلا جذابًا للغاية، حيث إنها تيسر تواجد المنظومات المستقلة القائمة بذاتها، والتى لا تحتاج لوقود وتتمتع بدرجة عالية من الاعتمادية. علاوة على ذلك، فإن جميع الدول النامية تقريبًا تقع داخل نطاق الحزام الشمسى من العالم، ويحيا نحو ٤٠% من تعداد سكان العالم فى قرى تلك البلدان حيث تمثل لا مركزية توليد الكهرباء ضرورة حيوية.

جـ- من المتوقع - خلال عقود عدة مستقبلة - أن تزيد دول العالم المتقدمة منها والنامية - استهلاكها من الكهرباء، على أن سؤالا ضمنيا سوف يصاحب هذه الزيادة:

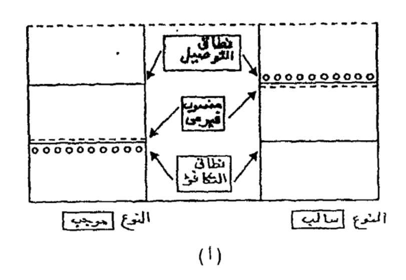
هل بوسعنا أن نرفع من استهلاكنا دون أن نزيد من مخاطر التدهور البيئى؟

إن التأثير الكهربى - الضوئى الذى تتحول فيه طاقة الفوتونات - عن طريق تقنيات المادة وهى فى الحالة الصلبة - إلى كهرباء (electivity)، يمكنه أن يساهم مساهمة ضخمة فى سد الاحتياجات من الطاقة، وتتمثل سلبيات استعمال الظاهرة الكهربية الضوئية فى ارتفاع التكلفة وعدم نضج تقنياتها، بيد أن عقدا من البحوث قد أحدث تقدمًا فى هذه التقنية ووصل بها إلى نقطة اقتحمت معها أسواق الكهرباء كثيفة الاستخدام. إن التقدم فى مجال التأثير الكهروضوئى كفيل بأن يجعله واحدًا من تقنيات العالم المفضلة لتوليد الطاقة الكهربية.

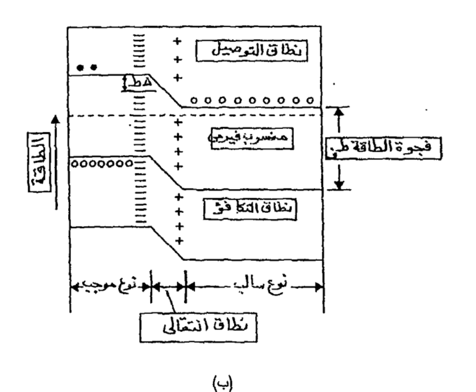
التأثير الكهروضوئى (الظاهرة الكهروضوئية):

تستخدم وصلة من أشباه الموصلات من النوعين الموجب والسالب فى تصنيع الخلية الكهروضوئية، ويمكن تشكيل هذه الوصلة بإنماء بلورة شبه موصل منفردة، جزء منها من النوع الموجب والآخر من النوع السالب، ويصور شكل (٢ - ١) الرسم البيانى لنطاقات الطاقة للبلورات من النوعين الموجب والسالب قبل وصلهما ببعضهما، ويبين الشكل أيضًا بوضوح مستويات فيرمى(*)، وعندما تدفع بلورتان معًا فإن الإلكترونات تتسرب من الجانب السالب إلى الجانب الموجب حيث تعود إلى الاندماج بالفتحات الحرة، وفى نفس الوقت تتسرب الفتحات الموجبة من الجانب الموجب إلى الجانب السالب، حيث تعود إلى الاتحاد بالإلكترونات الحرة.

(*) يقصد بمستوى أو منسوب فيرمى Fermi level الحالة الكمومية التى تحتلها الطاقة الحركية للإلكترونات الحرة ، وكما سيرد شرحه فى الباب التاسع (المترجم)



(أ)



(ب)

شكل (٢-١)

رسم بيانى لنطاقات الطاقة لوصلة من نوع الموجب – السالب
(أ) لأشباه موصلات معزولة (من النوعين الموجب والسالب)
(ب) وصلة موجبة – سالبة بعد الوصول لوضع الاتزان

ويترك انتشار الإلكترونات الحرة شحنة موجبة صافية من الناحية السالبة فى حين يخلف انتشار الفتحات الحرة شحنة سالبة صافية فى الجانب الموجب، ويفضى هذا التوزيع للشحنة إلى خلق مجال كهربائى، ومن ثم تولد فرق جهد عبر الوصلة، إن فرق جهد ذا طاقة Δ ط عند نقطة الاتصال يتولد له فى الحال من المقدار ما يوقف بالكاد أى انتشار أو تسرب إضافى لحاملات الشحنة.

ويسبب فرق جهد الاتصال تزحزح مستويات طاقة الجانب الموجب إلى أعلى ومستويات طاقة الجانب السالب إلى أسفل، بحيث يتساوى منسوبا (فيرمى) على الجانبين، وتصل المنظومة إلى وضع الاتزان.

ويوضح شكل (٢-١ ب) الشكل البيانى لنطاق الطاقة للدايود(*) عند ظروف الاتزان النهائى فى غياب أى مصدر خارجى للطاقة.

عندما يصطدم إشعاع شمسى كهرومغناطيسى ذو طاقات فوتونية أعلى من الفجوة فى الطاقة (ط ف) بوصلة م – س (موجب – سالب) تكتسب الإلكترونات فى نطاق التكافؤ طاقة كافية لكى تثب إلى نطاق التوصيل، وبالتالى تنتج أزواجًا من الإلكترونات والفتحات، ومهمة الوصلة أن تفصل بين هذه الثنائيات، فيهبط الإلكترون إلى أسفل (تل) فرق الجهد وإلى الجانب السالب، بينما تتجه الفتحات إلى أعلى (تل) الجهد وإلى الجانب الموجب، وينتج عن هذا الفصل تقليص ارتفاع تل الجهد، ويتم الوصول – فى خاتمة المطاف – إلى شروط جديدة للاتزان عبر الوصلة بظهور فرق فى الجهد، ويطلق على ذلك فولتية دائرة مفتوحة (ف د م) **open circuit voltage** وهى دالة فى شدة الإشعاع الساقط، والآن إذا وصلت

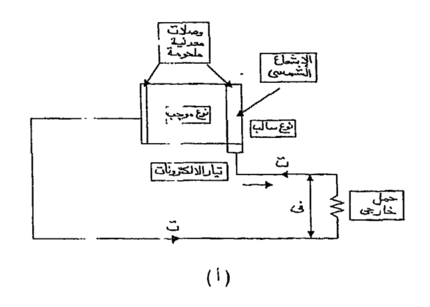
(*) الدايود **diode** : أداة إلكترونية تحصر مرور التيار الكهربى فى اتجاه واحد (المترجم)

الوصلة بسلك خارجى يمكن إهمال مقاومته الكهربية، فإن ثنائيــات الإلكتــرون – الفتحة التى ولدتها الطاقة الشمسية ترغم على الانفصال وتمضى عبر تــل الجهــد بكامل ارتفاعه، وتيار القصر **Short Circuit** الذى يسود فى هذه الحالة هو الآخر دالة فى شدة الإشعاع الساقط، وفى شكل (٢–٢) وصلة ثنائية (موجــب – ســالب) تحت تأثير الإشعاع الشمسى.

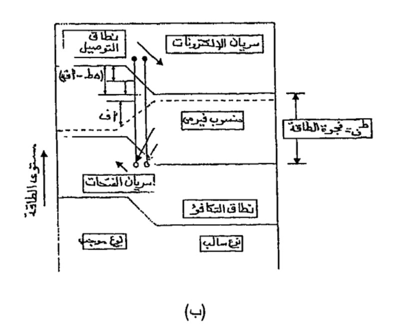
فالثنائيات المتولدة المكونة من إلكترونات وفتحات تنتقل إلى الدائرة الخارجية، حيث تبذل الشغل الذى نستفيد منه، وتوجد فى الدائرة الخارجية مقاومة كهربية، ومن ثم يلزم فرق جهد ملائم (ف) لسريان التيار، وفرق الجهد اللازم – بما يعادلــه مــن الطاقة المساوية لــ أ ف(*) لابد من الحصول عليه بموجب فرق فى منسوبى فيرمــى على جانبى الوصلة، أما وقد قلص فرق الجهد (أو تل الجهد) عبر الوصلة إلى (Δ ط – أ ف) (حيث Δ ط هو تيار القصر عبر كامل ارتفاع تل الجهد)، فليست الوصــلة الآن بالفاعلية التى تكفل فصل الثنائيات المكونة من إلكترونات وفتحات والتى تولدت بفعل الطاقة الشمسية، كما هو الوضع مع حالة القصر.

ونتيجة لذلك، فإن بعض حوامل الشحنة يمكنها الآن أن تتدبر أمرها وتعبــر الوصلة فى الاتجاه الخاطئ، بما يعنى وجود تسرب فى التيار عند الوصلة (تَ و)، وبالتبعية نقصان فى قيمة التيار (ت) الواصل للحمل.

(*) أ هنا ترمز إلى شحنة الإلكترون .



(أ)



(ب)

شكل (٢-٢)

كيفية عمل الوصلة الكهروضوئية

(أ) رسم تخطيطى للوصلة الثنائية (الموجب – السالب)

(ب) الرسم البيانى لمستويات (مناسيب) الطاقة

تيار الوصلة (ت و):

تيار الوصلة (ت و) هو صافى قيمة التيار المحصل السارى من الناحية الموجبة إلى الجانب السالب نتيجة كل حوامل الشحنة، والأقلية من حاملات الشحنة (الإلكترونات فى الجانب الموجب والفتحات فى الجانب السالب) يمكنها اجتياز الوصلة فى يسر، إذ أن الإلكترونات تفضل هبوط تل الجهد فى حين تؤثر الفتحات الصعود إلى أعلاه.

وتستطيع أغلبية حاملات الشحنة أن تعبر الوصلة إلا إذا كان لديها طاقة تزيد عن الحاجز الذى قيمته (Δ ط – أ ف)، وحيث إن حاملات الشحنة تميل إلى اتخاذ توزيع ماكسويل(*) **Maxwellian distribution** فالنسبة من أغلبية الحاملات التى تفلح فى القيام بهذه الرحلة هى هـ - ($\frac{\Delta \text{ط} - \text{أ ف}}{\text{بو . د}}$)، حيث بو هى ثابت بولتزمان(**)، د هى درجة الحرارة المطلقة، ولصياغة قيمة (ت و) فى معادلة سنفترض الآتى:

ث ١ = كثافة الإلكترونات فى الجانب الموجب.

ث ٢ = كثافة الفتحات فى الجانب الموجب.

ث ٣ = كثافة الإلكترونات فى الجانب السالب.

ث ٤ = كثافة الفتحات فى الجانب السالب.

(*) توزيع ماكسويل **Maxwellian distrlution** : يقصد به نموذج توزيع قيم سرعة الجزيئات لغاز فى توازن حرارى .(المترجم)

(**) ثابت بولتزمان : هو ثابت فيزيائى يربط طاقة الجزيئات بدرجة الحرارة ومقداره ١,٣٨ x ١٠^-٢٣ جول/ درجة مطلقة.(المترجم)

$\text{ت}_{١}$ = تيار الإلكترونات من الجانب الموجب إلى الجانب السالب.

$\text{ت}_{٢}$ = تيار الفتحات من الجانب الموجب إلى الجانب السالب.

$\text{ت}_{٣}$ = تيار الإلكترونات من الجانب السالب إلى الجانب الموجب.

$\text{ت}_{٤}$ = تيار الفتحات من الجانب السالب إلى الجانب الموجب.

ومن هنا فإن:

$$\text{ت}_{١} = \text{ك}_{١}\,\text{ث}_{١}$$

$$\text{ت}_{٢} = \text{ك}_{٢}\,\text{ث}_{٢}\,\text{هـ}^{-\left(\frac{\Delta\text{ط}-\text{أف}}{\text{بو.د}}\right)}$$

$$\text{ت}_{٣} = \text{ك}_{٣}\,\text{ث}_{٣}\,\text{هـ}^{-\left(\frac{\Delta\text{ط}-\text{أف}}{\text{بو.د}}\right)}$$

$$\text{ت}_{٤} = \text{ك}_{٤}\,\text{ث}_{٤}$$

حيث $\text{ك}_{١}$، $\text{ك}_{٢}$، $\text{ك}_{٣}$، $\text{ك}_{٤}$ مقادير ثابتة، فيكون محصلة التيار الصافى السارى من الجانب الموجب إلى الجانب السالب $= \text{ت}_{\text{و}} = \text{ت}_{١} + \text{ت}_{٢} + \text{ت}_{٣} + \text{ت}_{٤}$

$$= -(\text{ك}_{١}\text{ث}_{١} + \text{ك}_{٤}\text{ث}_{٤}) + (\text{ك}_{٢}\text{ث}_{٢} + \text{ك}_{٣}\text{ث}_{٣})\,\text{هـ}^{-\left(\frac{\Delta\text{ط}-\text{أف}}{\text{بو.د}}\right)} \qquad (٢-١)$$

وتصبح المعادلة رقم (٢-١) عندما تكون الوصلة فى وضع اتزان مع عدم وجود (تدفق إضائى) ($\text{ت}_{\text{و}}$ = ٠، ف = ٠)

من المعادلة رقم (٢-١): $(\text{ك}_{١}\text{ث}_{١} + \text{ك}_{٤}\text{ث}_{٤}) = (\text{ك}_{٢}\text{ث}_{٢} + \text{ك}_{٣}\text{ث}_{٣})\,\text{هـ}^{-\left(\frac{\Delta\text{ط}}{\text{بو.د}}\right)}$

(٢-٢)

وينبغى أن تكون المعادلة (٢-١) صحيحة أيضًا لـدى قـيم (ف) الـسالبة، وعندما تكون هذه القيمـــة السالبة مرتفعة عدديًا بما يكفى، فيمكننا إهمـال الحـد الثانى من المعادلة (٢-١) فنحصل على:

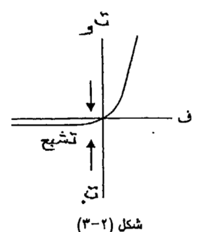
$$ت_{و} = -\ (ك_{١}\ ث_{١} + ك_{٤}\ ث_{٤}) = -\ ت. \qquad (٢-٣)$$

وهكذا فعند قيمة عالية لفرق جهد سالب (ف)، سـتوقف الوصـلة الثنائيـة (الموجب – السالب) (م – س) كل حاملات الشحنة الأغلبية، وتسمح فقط بمـرور حاملات الشحنة الأقلية عبر الوصلة، مولدة تيارًا معاكسًا قيمته (ت.) (يطلق عليـه التشبع العكسى أو تيار الإظلام)(*).

ومن المعادلات (٢-١)، (٢-٢)، (٢-٣) نصل إلى أن $ت_{و} = ت. [هـ^{\frac{اف}{بو.د}} - ١]$

$$(٢-٤)$$

والمعادلة (٢-٤) تعطى علاقة التيار بفرق الجهـد لوصـلة دايـود ثنائيـة (موجب – سالب)، ويوضح شكل (٢-٣) صورة هذه العلاقة.



شكل (٢-٣)
علاقة التيار بفرق الجهد لوصلة دايود

(*) تيار الإظلام : **Dark current** هو التيار الكهربى فى دائرة خلية ضوئية عند انقطاع الـضوء عنهـا (المترجم)

أداء الخلية الشمسية:

يبين شكل (٢-٤) الملامح الأساسية فى الخلية الشمسية، وهى مكونة من رقائق من السليكون المتبلر المعالج بالبورون، وهو أصلح أشباه الموصلات فى الوقت الراهن، والذى يعالج بالبورون وهو من شوائب العضو المستقبل لهذا الغرض(*).

ويمكن أن تتخذ الخلية والتى يبلغ سمكها نمطيًا ثلث الملليمتر شكلا مربعًا، أو دائريًا أو نصف دائرى، وتبلغ مساحة سطحها ١٠٠ مم مربع.

ويتسرب الفسفور (وهو من شوائب الجزء المانح Doner)(**) بين رقائق السليكون عند درجة ٨٥٠ ْم تقريبًا، مكونًا وصلة ثنائية (موجب – سالب) تحت سطح الواجهة بجزء من الميكرون، ويتخذ الاتصال الأمامى شكل شبكة كالأصابع، فى حين يغطى الاتصال الخلفى عادة كامل السطح الخلفى، وعادة ما يطلى السطح الأمامى بطبقة مانعة لانعكاس الأشعة.



شكل (٢-٤)
رسم تخطيطى لتركيب خلية شمسية نمطية ومكوناتها

(*) **acceptor impurity** : يقصد بها عنصر كالجاليوم يضاف خصيصًا لأشباه الموصلات لزيادة توصيلية النوع السالب بزيادة عدد الفتحات (المترجم)

(**) **Doner impurity** : يقصد بها عنصر كالأنتيمون أو الزرنيخ يضاف خصيصًا لمادة شبه الموصل لزيادة توصيلية النوع السالب (المترجم)

تنساب إلكترونات التوصيل – عند الوصلة – من الجانب السالب إلى الجانب الموجب، فتقترن بالفتحات، وتعادل شحناتها. وبالمثل تتحرك الفتحات من النطاق الموجب إلى النطاق السالب. ونتيجة لذلك تختفى الإلكترونات والفتحات بالقرب من الوصلة فيما يسمى بمنطقة النضوب أو النفاد **depletion area**، والتى يصل عرضها إلى ما بين $١٠^{-٤}$ إلى $١٠^{-٦}$ سنتيمتر، مخلفة وراءها طبقات من ذرات الشوائب المشحونة (بشحنة موجبة فى الجانب السالب وشحنة سالبة فى الجانب الموجب). ويتولد من التلامس فرق جهد له طاقة Δ ط عبر الوصلة، مقدارها يكفى بالكاد لمعاوقة أى تدفق أكثر من الإلكترونات والفتحات نتيجة منحدر التركز (*) **concentration gradient**. ويسبب جهد الاتصال هذا تحرك مستويات الطاقة فى نطاق المنطقة السالبة إلى أسفل كما يصعد نطاق المنطقة الموجبة إلى أعلى بحيث يبقى منسوبا فرمى للمنطقتين أفقيا ومستديما لدى الوصلة. وعندما يسقط الضوء على سطح نشط تتفاعل الفوتونات ذات الطاقة التى تتجاوز فجوة الطاقة $ط_ن$ لشبه الموصل (ومقدرها ١,١ إلكترون فولت فى حالة السيلكون) مع إلكترونات التكافؤ وترفعها حتى نطاق التوصيل. ويخلف هذا التحرك فى مكانه فجوات. وفى حالة السليكون المتبلر تتولد حاملات الطاقة عبر سمك الخلية كله فى تركزات تعتمد على شدة الضوء وعلى تركيبه الطيفى. ولكى تفرغ هذه الثنائيات طاقتها فى دائرة خارجية ينبغى أن يفصل الإلكترون سالب الشحنة عن الفجوة موجبة الشحنة. وبالإمكان التوصل إلى هذا الفصل عن طريق مجال الوصلة الداخلى فى الطبقة الناضبة. والإلكترونات المتولدة فى الجانب الموجب، والفجوات المتولدة فى الجانب السالب (وهى الأقلية من حاملات الطاقة) ستنجذب إلى المجال وتنساب صوب الجانبين السالب والموجب على الترتيب، ومن ثم يتقلص مقدار الحواجز **barriers** وسيكون هناك فرق جهد كهربى فى الوصلات الخارجية للدايود بما يتيح توليد

(*) يقصد بمنحنى التركز التغير التدريجى فى تركيز مادة مذابة فى محلول كدالة فى المسافة. (المترجم)

قدرة لتشغيل حمل خارجى. ويمكن تلخيص المتطلبات اللازمة للحصول على خلية شمسية ذات كفاءة فيما يلى:

١) امتصاص ما يكفى من ضوء الشمس بما يتيح تولد الثنائيات المكونة من إلكترونات وفجوات.

٢) ينبغى الفصل ما بين الإلكترونات والفتحات فى الثنائيات المتولدة.

٣) فرق الجهد المتولد يتوجب أن يكون بالكبر الكافى، إذ أنه يحدد أقصى فولتية نحصل عليها من الخلية.

٤) الهبوط فى الجهد بسبب المقاومة الكهربية الدخيلة غير المرغوب فيها يجب تقليله قدر الإمكان

٥) الغطاء الشبكى المعدنى ينبغى أن يكون صغيرا، لأن الطبقات المعدنية السميكة غير شفافة.

وينتج عند التفاعل بين ضوء الشمس والخلية الشمسية العمليات التالية:

١) انعكاس جزء من القدرة وارتدادها من على سطح الخلية.

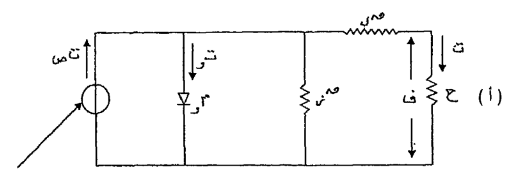
٢) عملية امتصاص ينجم عنها توليد ثنائيات من الإلكترونات والفتحات، وامتصاص دخيل غير مرغوب يؤدى إلى أثر حرارى. وهناك جزء من ضوء الشمس لا يمتص وإنما ينتقل خلال الخلية.

٣) انفصال حاملات طاقة ضوئية متولدة وتجمعها.

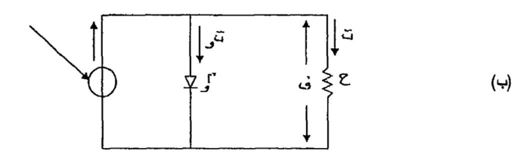
٤) سريان حاملات الطاقة نحو الوصلات الخارجية.

٥) إفراغ القدرة الضوئية المتولدة فى حمل خارجى.

ولتحليل أداء الخلية يمكن عمل نمـوذج مكبـر أو عيـانى لهـذه العمليـة (الميكروسكوبية) فى شكل دائرة كهربية مكافئة (شكل ٢-٥أ) تتكون من مـصدر تيار تعتمد شدته على الضوء يصدر تيارا مقداره ت ص إلى شبكة من المقاومـات تضم وصلة ذات مقاومة ق و، ومقاومة داخلية موصلة على التوازى ق ز، ومقاومة داخلية موصلة على التوالى ق ر إلى جانب الحمل الخارجى ح.



مصدر لتيار ثابت يعتمد على كمية الضوء



شكل (٢-٥)

دائرة مكافئة لخلية شمسية

أ - النموذج الفعلى ب - النموذج المبسط

وعادة ما تكون مقاومة التوازى ذات قيمة أعلى كثيرا من مقاومـة الحمـل الخارجى، بحيث يسرى معظم التيار المتاح خلال الحمل، فى حين تكون مقاومـة التوالى الداخلية أقل كثيرا من مقاومة الحمل الخارجى بحيث لا تـستهلك إلا أقـل

القدرة داخليا فى نطاق الخلية (يوضح شكل ٢-٥ أ الدائرية الفعلية، والتى يبسطها شكل ٢-٥ ب بهدف التحليل دونما إخلال كبير بالوضع الفعلى).

وحسب الدائرة المبسطة يمكن التعبير عن تيار الحمل الخارجى بالصورة

$$ت_{ح} = ت_{ص} - ت_{و} \qquad (٢ - ٥)$$

$$= ت_{ص} - ت_{.} \left(هـ^{\left(\frac{أ\ ف}{بو.د}\right)} - ١ \right)$$

وعند شروط القصر Short circuit (ف = ٠) يكون $ت_{ح} = ت_{ص}$، وهو تيار القصر الذى يولده مصدر التيار المعتمد على الضوء، وتحت شروط الدائرة المفتوحة Open circuit ($ت_{ح} = ٠$)، تعطينا المعادلة (٢- ٥) أقصى قيمة لجهد الدائرة المفتوحة $ف_{دم}$.

$$هـ^{\left(\frac{أ\ ف_{دم}}{بو.د}\right)} - ١ = ت_{ص} \div ت_{.}$$

$$ف_{دم} = \frac{بو.د}{أ} \ لو_{هـ} \left[\left(\frac{ت_{ص}}{ت_{.}}\right) + ١ \right]$$

والقدرة الناتجة ق من الخلية الكهروضوئية = ف. ت، ولشدة ضوء معينة، تتوقف القدرة الناتجة على قيمة مقاومة الحمل ح:

$$ق = ت_{ص} - ت_{.} \left[هـ^{\frac{أ\ ف}{بو.د}} - ١ \right] . ف \qquad (٢ - ٦)$$

وبمفاضلة المعادلة (٢-٦) بالنسبة لـ (ف) ومساواة النتيجة بالصفر يمكن الحصول على قيمة فرق جهد الحمل الخارجى $ف_{ح}$ الذى يناظر أقصى قدرة تنتجها الخلية:

$$[ت_{ص} - (ت.هـ^{(\frac{أ ف}{بو.د}-1)})] + ف_{ح}[- ت.(\frac{أ}{بو.د}).هـ^{(\frac{أ ف_{ح}}{بو.د}-1)}] = .$$

$$هـ^{\frac{أ ف_{ح}}{بو.د}} (1 + \frac{أ ف_{ح}}{بو.د}) = 1 + \frac{ت_{ص}}{ت.} \quad (٢-٧)$$

وهكذا، بمعرفة $ت_{ص}$، ت.، د يمكن تحديد قيمة $ف_{ح}$ عن طريق التجربة. وقيمة تيار الحمل $ت_{ح}$ الذى يناظر القيمة القصوى للقدرة المنتجة يمكن الحصول عليه بالتعويض من المعادلة (٢ – ٧) فى المعادلة (٢ – ٦).

$$ت_{ح} = ت_{ص} - ت. [هـ^{(\frac{أ ف_{ح}}{بو.د}-1)}]$$

$$= ت_{ص} - ت. [(1 + \frac{ت_{ص}}{ت.}) \div (1 + \frac{أ ف_{ح}}{بو.د}) - 1]$$

$$= \frac{أ ف_{ح}}{بو.د} \div [1 + \frac{أ ف_{ح}}{بو.د}] (ت_{ص} + ت.)$$

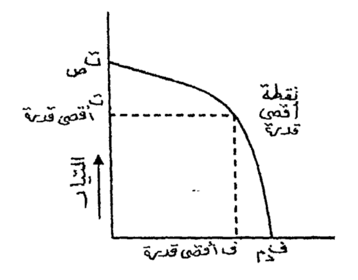
وأقصى قدرة يمكن الحصول عليها من الخلية $ق_{ع} = ت_{ح} ف_{ح}$

$$= \frac{أ ف_{ح}}{بو.د} \div (1 + \frac{أ ف_{ح}}{بو.د}). ف_{ح} (ت_{ص} + ت.)$$

ويصور شكل (٢ – ٦) علاقة نمطية بين الفولت والتيار عبر حمل لخلية شمسية تحت ظروف إضاءة بعينها.

والقيمة القصوى للقدرة تحدث مع الحد الأقصى لقيمة ف. ت (حاصل ضرب الفولتية فى التيار)، ويحدث ذلك عندما يكون للمستطيل الواقع داخل منحنى العلاقة بالشكل. أقصى مساحة عند قيمة معينة للقدرة المدخلة للخلية الشمسية، وتعطى كفاءة التحويل التى تحقق أقصى قدرة منتجة من العلاقة لأقصى قدرة

$$= \frac{ق_{\text{أقصى قدرة}}}{ق_{\text{مدخلة}}}$$



شكل (٢-٦)

علاقة الفولت بالتيار عبر الحمل لخلية شمسية نمطية

وهناك العديد من العوامل الداخلة فى تشغيل الخلايا الشمسية، والتى تحد من كفاءة تحويل الطاقة إلى حدود ٢٠ إلى ٣٠%، ويأتى هذا التحديد أساسًا كنتيجة تجاوب الخلية مع جزء فقط من الأطوال الموجية المتاحة بالطيف الشمسى، فالفوتونات ذات الطول الموجى الذى يزيد عن ١,٢٢ميكرون ليس لها من الطاقة ما يكفى لتوليد ثنائيات الإلكترونات – الفتحات فى خلية شمسية – سليكونية، وطاقة الفوتون الفائضة لا تسهم فى قيمة التيار المتولد. والطاقة التى لا تستخدم فى إفراز أزواج من الإلكترونات – الفتحات تزيد – فقط – من درجة حرارة الخلية الشمسية.

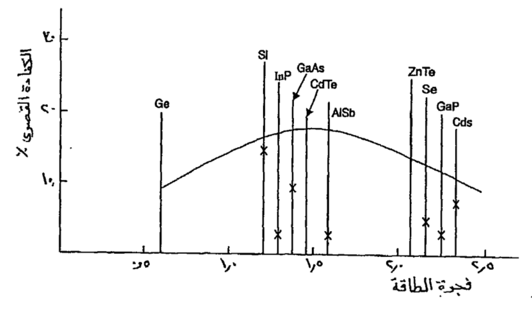
والتأثير الحرارى فى تذبذبات التشبيكة يشجع حاملات الطاقة على اجتياز تل فرق الجهد وعبور الوصلة فى الطريق الخطأ، مما يضفى تأثيرًا سلبيًا على كفاءة تحويل الطاقة، وعلى ذلك فلابد من عكس الجزء غير المرغوب فيه من الإشعاع الساقط للاحتفاظ بالخلية فى درجة حرارة منخفضة.

اختيار المواد:

عادة ما يحدث التأثيران التاليان فى مواد أشباه الموصلات المستخدمة فـى محولات الطاقة الشمسية:

١) يقل عدد الفوتونات الممتصة ذات الطاقة الأعلى من فجوة النطاق بازدياد فجوة النطاق، وبازدياد فجوة النطاق تنخفض كثافة تيار التـشبع (ت.) وبالتالى يرتفع فرق الجهد المتولد.

٢) هناك ملحوظة نوعية عن أن انخفاض (ت.) نتيجة ازدياد فجوة النطاق، يزيد من قيمة فولتية الدائرة المفتوحة، فى علاقة تناسب مع لوغـاريتم النسبة $\frac{ت_ص}{ت_.}$



شكل (٢-٧)

أقصى قيمة لكفاءة تحويل الطاقة الشمسية كدالة فى فجوة الطاقة لشبه موصل، ومبين بالرسم قيم أقصى كفاءة تم قياسها لمختلف المواد بعبور فجوة الطاقة لهذه المادة
رسم المنحنى البيانى على أساس (وصلة مثالية) خارج الجو

يبين شكل (٢-٧) تأثير هذين العاملين على الحد الأقصى لكفاءة التحويل لمحول كهروضوئى، وهذا المنحنى الذى توصل إليه لوفرسكى **Loverski**، يعطى أقصى كفاءة نظرية، على أية حال، فالمنحنى يتنبأ بقيم للكفاءة القصوى أعلى من كفاءة أشباه الموصلات السليكونية ذات فجوات طاقة ما بين ١,١، ٢,٣ إلكترون فولت، وتشمل المواد التى لها فجوات طاقة فى هذا النطاق: فوسفيد الأنديوم (**I_n P**) (١,٢٧ إلكترون فولت) وزرنيخ الجاليوم (**G_a A_s**) (١,٣٥ إلكترون فولت)، وأنتيموتيد الألومنيوم (**AlS_b**) (١,٤٩ إلكترون فولت)، وتيلوريد الكادميوم (**Cd Te**) (١,٥ إلكترون فولت)، وتيلوريد الزنك (**Z_n T_e**) (٢,١ إلكترون فولت)، وزرنيخ الألومنيوم (**AlA_s**) (٢,١٦ إلكترون فولت")، وفوسفيد الجاليوم (**G_a P**) (٢,٢٤ إلكترون فولت)، ويضم هذا النطاق من فجوات الطاقة بالمثل خلائط من أشباه الموصلات تتكون من مواد شبه موصلة من طوائف **III-V،II-VI** (عناصر المجموعتين ٣، ٥ أو ٢، ٦ من جدول العناصر الدورى) بنسب متباينة، وكمثال على هذه المواد مادة **G_a As_x P_{x-1}** والتى تقع فجوة طاقتها ما بين ١,٣٥ إلكترون فولت (القيمة الخاصة بزرنيخ الجاليوم)، ٢,٢٤ إلكترون فولت (القيمة الخاصة بفوسفيد الجاليوم)، والمواد الأخرى ذات قيم فجوات طاقة تؤهلها للاستخدام فى وصلات هذا النوع من محولات الطاقة تتكون من اثنين من أشباه الموصلات (وتسمى الوصلات متعددة المواد) مثل السيلينيوم **S_e** وسيلينيد الكادميوم (**C_d S_e**)، وسلفيد الكادميوم (**C_d S**) مع كبريتيد النحاس (**C_uS**).

العوامل التى تحد الأداء:

تحد العوامل الآتية من أداء الخلايا الشمسية:

١) **الفاقد بالانعكاس:** فبعض الإشعاع الساقط يفقد بالانعكاس على سطح الخلية والمادة المستخدمة لوقايتها من الظروف الجوية، وتتراوح نسبة الفقد بالانعكاس فى خلية مطلية بمادة مضادة للانعكاس ما بين ٥، ١٠%.

٢) **الامتصاص غير المكتمل:** فالفوتونات التى تقل طاقتها عن فجوة الطاقة سيقتصر أمرها على توليد حرارة فى الخلية، ويزيد هذا الفاقد كلما زادت قيمة فجوة الطاقة.

٣) **الاستفادة الجزئية من طاقة الفوتونات:** يكون لكثير من الفوتونات التى تفرز ثنائيات الإلكترونات – الفتحات من الطاقة ما يربو على ما يلزم لهذه العملية، وتنتشر هذه الطاقة الزائدة فى شكل حرارة، وعلى ذلك، فكلما زادت فجوة الطاقة قل الفاقد، فإذا ما أخذنا فى الحسبان عاملى الفقدان الثانى والثالث، وجدنا أن شبه موصل ذا فجوة طاقة ٠,٩ إلكترون فولت هو أحسن ما يتبع لطيف **AMO** وفى المواد ذات معاملات الامتصاص المرتفعة مثل السليكون غير المتبلر وزرنيخ الجاليوم، يقل سمك الخلية اللازم عن حالة السليكون المتبلر. وفى الحالة الأخيرة يصل السمك المطلوب لامتصاص ٩٠% من الإشعاع إلى ٣٠٠ ميكرون.

٤) **فاقد التجميع:** حاملات الطاقة التى تبلغ الوصلة قبل عودة الاندماج هى فقط التى تتجمع وتسهم فى التيار المتولد، فى حين أن سواها تنتج حرارة فقط، وكفاءة التجميع هى النسبة ما بين كثافة تيار قصر الدائرة الفعلى، وكثافة تيار القصر الحادث فى حالة عدم عودة الاندماج.

والعوامل التى تؤثر فى كفاءة التجميع هذه هى:

أ – خواص الامتصاص لشبه الموصل، والتى تحدد التوزيع الهندسى لثنائيات الإلكترون – فتحة المتولدة فى البلورة.

ب– عمق الوصلة.

جـ – عرض الطبقة المستنفدة **depletion layer**.

د- المعدل الذى تندمج به الإلكترونات والفتحات عند السطح (أى سرعة عودة الاندماج السطحى).

هـ- المسافة التى ينتقلها الإلكترون فى المنطقة الموجبة، وتنتقلها الفتحة فى المنطقة السالبة قبل عودة الاندماج (طول مدى الانتشار للأقلية من حوامل الطاقة).

و- وجود وشدة أى مجالات كهربية متولدة من تدرج منحدرات تركيز الشوائب عند مناطق السطح والقاعدة، والتى من شأنها أن تساعد على تسارع حركة حاملات الطاقة صوب الوصلة، ويجوز أن تتراوح كفاءة التجميع بين ٩٥% (لخلية شمسية مفردة من نوع السليكون المتبلر ذات كفاءة عالية)، ٥٠% فى الخلايا منخفضة الكفاءة دقيقة السمك.

٥) **عامل الفولتية:** تكون فولتية الدائرة المفتوحة دائمًا أقل من فجوة الطاقة للأسباب التالية:

أ - فولتية الدائرة المفتوحة التى تساوى فرق الجهد للمجال الكهربى عند الوصلة يمكن الحصول عليها فقط مع ارتفاع المدخلات ارتفاعًا استثنائيًا، والتى يمكن الوصول إليها بضوء شمس غير مركز.

ب- نتيجة معالجة شبه الموصل بمادة فلزية **doping**(*)، فإن ارتفاع الحائل أو المانع يكون دائمًا أقل من فجوة الطاقة، وسترفع زيادة فجوة الطاقة من فولتية الدائرة المفتوحة، وإذا ما تخطى هذا الارتفاع مستوى الحد الأقصى لتولد ثنائيات الإلكترونات، الفتحات، سينخفض مقدار التيار المتولد، فهناك قيمة مثلى لفجوة الطاقة ط ف لأى توزيع طيفى معين،

(*) **doping** : يقصد بها عملية إدخال شوائب معينة فى تركيب شبه الموصل بغرض الحصول على خواص بعينها (المترجم)

عنده يصل حاصل ضرب تيار القصر، وفولتية الدائرة المفتوحة إلى الحد الأقصى، وهذه القيمة المثلى بالنسبة لضوء الشمس الواصل للأرض مباشرة هى – نظريًا – ١,٤ إلكترون فولت.

٦) **معامل شكل المنحنى:** يعتمد شكل منحنى العلاقة بين الفولتية والتيار على خواص دايود الوصلة، ومن ثم فإن أقصى قدرة دائمًا ما تقل عن حاصل ضرب تيار القصر للدائرة فى فولتية الدائرة المفتوحة، حتى مع غياب مقاومة موصلة على التوالى، وبزيادة فجوة الطاقة تتحسن نوعية الوصلة ومن ثم يقترب شكل المستطيل الواقع داخل منحنى العلاقة بين الفولتية والتيار فى شكل (٢-٦) من المربع أكثر وأكثر.

٧) **الفواقد فى مقاومات التوالى:** يسبب فاقد القدرة فى الخلية نتيجة مقاومات التوالى تفلطحًا أو تسطحًا فى شكل منحنى علاقة الفولتية بالتيار، ويمكن الهبوط بهذا الفاقد إلى حده الأدنى بتحسين الشكل الهندسى لشبكة التلامسات وبتحسين تلامسات المقاومات، وبتقليل مقاومة الصفيحة فى الطبقة السطحية، ويعبر عن تأثير نوعية الوصلة والمقاومات على التوالى على الأداء بمعامل الامتلاء **Fill factor** المعطى بالعلاقة:

معامل الامتلاء = القيمة القصوى لقدرة ÷ (تيار القصر للدائرة × فولتية الدائرة المفتوحة).

٨) **الفاقد نتيجة تغطية المعدن:** ويساوى $\frac{\text{س}_{\text{م}}}{\text{س}_{\text{ك}}}$، حيث $\text{س}_{\text{م}}$ هى مساحة السطح الأمامى غير المغطى بالمعدن، $\text{س}_{\text{ك}}$ هى المساحة الكلية، وهو محدد تمليه الاعتبارات التقنية ويحدده معامل التغطية $(1 - \frac{\text{س}_{\text{م}}}{\text{س}_{\text{ك}}})$، وكلما ارتفع معامل التغطية هذا قلت المقاومة على التوالى، والفاقد النمطى نتيجة عامل التغطية فى الخلية الشمسية يتراوح ما بين ٥، ١٠%.

الخواص المرغوبة فى أشباه الموصلات المستعملة فى الخلايا:

لقد أخذنا فى الاعتبار – حتى الآن – الآلية التى تحول بها الوصلة (الموجبة – السالبة)، طاقة الإشعاع إلى طاقة كهربية، وصغنا تعبيرا لكفاءة الجهاز الكهروضوئى بدلالة المتغيرات العيانية (الماكروسكوبية) المنظورة مثل كثافة تيار الإظلام، وشدة تيار قصر الدائرة، والفولتية لدى نقطة أقصى قدرة، ولكننا لا نستخلص من هذه الصيغ أية معلومات عن الخواص (الميكروسكوبية) المرغوب فيها لشبه الموصل الذى تصنع منه الخلية، وسنناقش فيما يلى هذه الخواص التى تثبت جدواها عند استعمالها فى الخلية الكهروضوئية.

امتصاص الضوء:

لبعض أشباه الموصلات كفاءة عالية فى امتصاص الضوء، حيث تمتص حوالى ٩٠% من ضوء الشمس عبر سمك ١ ميكرون ($١٠^{-٤}$ سم)، ومن ناحية أخرى تقل قدرة بعض أنواع أشباه الموصلات الأخرى على امتصاص الضوء الشمسى، ويلزم أن يصل سمكها إلى ١٠٠ ميكرون(٠,٠١ سم) لتمتص نفس النسبة (٩٠%) منه، والفرق فى تصميم الجهاز والمتطلبات من المادة لهذين النوعين من أشباه الموصلات جد عظيم، ومن أمثلة أشباه الموصلات الكهروضوئية التى تتمتع بامتصاصية عالية، تيلوريد الكادميوم، وديسيلينيد إنديوم النحاس والسليكون غير المتبلور، فى حين يمثل السليكون المتبلر شبه موصل ضعيف الامتصاص، ويطلق على ممتصات الضوء القوية جدًا اسم "أشباه الموصلات ذات فجوة نطاق مباشرة **direct band gap conductors** فى حين تسمى ماصات الضوء الرديئة مواد فجوة النطاق غير المباشرة **indirect band gap materials** وفى المواد التى لها فجوة نطاق غير مباشرة، يمكن لفوتون ذى طاقة مساوية لفجوة نطاق المادة، أن يحرر

إلكترونا خارجيًا ويخلق زوجًا من (الإلكترون / فتحة)، وفى حالة أشباه الموصلات ذات فجوة النطاق المباشر فإن فوتونا وفونونا(*) لهما طاقة ملائمة يمتصان كلاهما آنيا بواسطة نفس الإلكترون المقيد، وتنتج ثنائية إلكترون/ فتحة حرة.

طول الامتصاص:

طول الامتصاص: هو متوسط المسافة التى يقطعها الضوء فى مادة ما قبل امتصاص ٦٣% منه، ويحدد طول الامتصاص هذا مدى قدرة المادة على امتصاص الضوء، وهو بالمثل عامل جوهرى يراعى عند تصميم الخلايا، إذ أنه يحدد – جزئيًا – مدى السمك الذى تصنع به الطبقات الماصة، ويبلغ طول الامتصاص للسليكون المتبلر حوالى ٣٠ ميكرونًا، ولأشباه الموصلات ذوات فجوات النطاق المباشرة كتيلوريد الكادميوم وديسيلينيد إنديوم النحاس يصل طول الامتصاص إلى ٠,٣ ميكرون.

تأثير طاقة الفوتون:

للفوتونات ذات الطاقات المختلفة أطوال امتصاص مختلفة داخل نفس المادة، فالفوتونات ذات الطاقة الأعلى يزيد احتمال امتصاصها عن تلك ذات الطاقة الأقل حتى لو زادت هذه الطاقة الأقل عن طاقة فجوة النطاق، فعلى سبيل المثال لا يصل طول الامتصاص للفوتونات عالية الطاقة (أكبر من ٢,٥ إلكترون فولت) إلى ٠,١ ميكرون فى حالة ديسيلينيد إنديوم النحاس ذى فجوة نطاق ١,٠ إلكترون فولت فى حين أن حزمة من الفوتونات منخفضة الطاقة (١,١ إلكترون فولت) قد يلزمها ١ ميكرون لتصل لنفس المستوى من الإضعاف، وحتى مع السليكون المتبلر (وفجوة نطاقه ١,١ إلكترون قولت) تمتص الفوتونات ذات الطاقة ٢,٥ إلكترون فولت خلال

(*) الفونون فى الفيزياء هو شبه جسيم **quasi – particle** فى مادة متبلورة يلعب دورًا مهمًا فى توصيليتها الكهربية والحرارية (المترجم)

٠,٥ ميكرون فى حين يلزم للفوتونات ذات ١,٢ إلكترون فولت ١٠٠ ميكرون لتمتص بنفس القدر، وهذا الاختلاف فى الامتصاص بين الفوتونات ذات الطاقات العالية والمنخفضة ينعكس على تصميم الخلية وعلى العوامل التى تحد من أدائها.

تسليط المجال الكهربى:

يمثل طول الامتصاص العامل المحورى الذى يتحكم فى تصميم الجهاز الكهروضوئى، والدور الرئيسى لهذا الجهاز هو فصل الإلكترونات عن الفتحات بمجال يتكون. وفى واقع الأمر، فإن تسليط المجال الكهربى الملائم فيما يتعلق بامتصاص الضوء هو العامل الحاسم فى مدى فاعلية الجهاز الكهروضوئى، ولتحقيق هذا الهدف ينبغى أن يوضع المجال الكهربى فى وسط الحيز الذى تقع به أغلب عملية امتصاص الضوء الشمسى، وبتحقيق هذا الشرط سيمتص الكثير من أشعة الشمس، وتتولد حاملات طاقة حرة فى المكان الملائم على مقربة من المجال، بما يسمح بالاستفادة من هذه الحاملات الواقعة فى نطاق تأثير المجال الكهربى. غير أن ظاهرتى الانجراف **drift** والانتشار **diffusion** ينبغى مناقشتهما لشرح استعمال حاملات الطاقة الحرة المتولدة من الضوء النائى فى إنتاج الكهرباء.

الانجراف drift:

يطلق على الإزاحة فى حاملات الطاقة الحرة والناجمة عن المجال (الانجراف **drift**). والمجال المتكون ذو قوة فصل هائلة بين الحاملات الحرة التى تحمل شحنات ذات إشارات مختلفة بمجرد وقوعها تحت تأثيره. ففى المواد التى لها فجوة نطاق مباشرة تمتص أغلب فوتونات الضوء الشمسى داخل نطاق المجال الكهربى أو النطاق القريب جدًا منها، لأن أغلب أطوال الامتصاص النمطية لهذه المواد (١ ميكرون) تساوى عرض المجال المتكون، وبالتموضع الملائم للمجال تنفصل – بالتقريب – كل حوامل الطاقة المتولدة من ضوء الشمس بصورة تلقائية

وتسهم فى التيار الكهربائى المنتج. والمجال الكهربائى المسلط بصورة ملائمة بالنسبة لشبه الموصل ذى فجوة نطاق مباشرة يفصل بسهوله فصلا كاملا تقريبا ما بين الإلكترونات والفتحات مما يشكل ميزة كبرى في الخلايا الشمسية المصنعة من هذه المواد . أما فى أشباه الموصلات ذات فجوة النطاق غير المباشرة حيث طول الامتصاص ١٠ ميكرون، فإن جميع الضوء الممتص تقريبا يكون خارج تأثير المجال. وهنا تتسبب آلية أخرى فى فصل الشحنات هى الانتشار **diffusion**.

الانتشار:

متوسط المسافة التى تستطيع القلة من حاملات الطاقة المتولدة من الضوء (الإلكترونات على الناحية الموجبة والفتحات فى الناحية السالبة) أن تقطعها فى مجال المكان المتكون قبل أن تعود أدراجها إلى حالات مقيدة **fixed** تسمى بطول الانتشار **diffusion length**. وكلما زاد الطول الانتشاري لمادة ما ، زادت الفرصة فى تولد تيار أكبر. وفى المواد الكهروضوئية الحقيقية تتراوح الأطوال الانتشارية بين أقل من الميكرون فى معظم الطبقات الرقيقة إلى أكثر من ١٠٠ ميكرون فى بعض المواد ذات البلورة المفردة. ويلزم طول انتشارى جيد – بصفة مطلقة – لحسن أداء المواد ذات فجوة النطاق غير المباشرة كبلورات السيلكون. والعامل الحاسم الذى يحكم تجمع التيار بتأثير الانتشارية هو الطول الانتشارى للمادة معبرًا عنه كجزء من طول الامتصاص. وعلى ذلك فإذا كانت نسبة الطول الانتشارى إلى طول الامتصاص أكبر من الواحد الصحيح فستنفصل معظم حاملات الطاقة. والانتشارية محكومة، يحدها ميل الحاملات الحرة إلى الاندماج من جديد . وأبسط صورة لعودة الاندماج تحدث عندما يتفق أن يتلاقى حامل طاقة من الأقلية (أي إلكترون في مادة من النوع الموجب) مع فتحة ويسقط فيها، وهو حدث نادر الوقوع في واقع الحال نسبيا حتى فى وجود وفرة من الفتحات المتاحة. والمواد التى تسود فيها آلية عودة الاندماج هذه مواد فائقة ذات أطوال انتشارية بالغة الطول.

مفرع أو مجزئ التيار Shunt:

لقد ناقشنا حتى الآن الأمور التـــي تـــؤثر علـــى التيـــار الكهربـــى: عـــدد الإلكترونات والفتحات المتولدة عن الضوء، والتى تسهم فى سريان التيار من خلال الانجراف والانتشار... إلا أن مفهوم مراكز عودة الاندماج (وتسمى مراكز عـــودة الاندماج فى نطاق المجال بالمفرعات أو المجزئات) يؤدى بطبيعة الحال إلى مبحث مختلف، فالفاقد فى الفولتية قد يكون أخطر شأنا من الفاقد فى التيار نتيجـــة عـــودة الاندماج. والفولتية فى الخلايا الكهروضوئية يتوقف مقدارها بصورة أساسيه علـــى ارتفاع أبعاد المجال المتكون، بيد أن مراكز عودة الاندماج الواقعة داخل المجـــال يمكن أن تقلل – وبشدة – قوة المجال، وبالتالى تنخفض الفولتية بصورة ملموسة.

المقاومة على التوالى:

هناك – لفقد الفولتية – آلية أخطر بكثير، هى المقاومـــة علـــى التـــوالى. ويحصل هذا الفقد بسبب نفس الفاقد فى المقاومة الذى يواكب أية حركة للـــشحنات الحرة خلال الأسلاك. فأى سريان للتيار (أى الإلكترونات)، يولد نوعا مـــن الفاقـــد بالاحتكاك (هو ما نسميه بالمقاومة). والفاقد فى الفولتيـــة يـــساوى مقـــدار التيـــار السارى مضروبا فى المقاومة. ويزيد الفاقد فى الفولتية بزيادة شدة التيار أو بزيادة المقاومة.

وقد يرتفع الفاقد إلى مـــستوى ملمـــوس نتيجـــة المقاومـــة فـــى الأجهـــزة الكهروضوئية فى طبقات شبه الموصل الداخلية من الخلية. وقد تصل مقاومة أشباه الموصلات ملايين أضعاف مقاومة المعادن. ويحدث الفاقـــد لأن حوامـــل الطاقـــة الحرة التى تنفصل بسبب المجال المتكون لابد أن تستمر فى الانتقـــال مـــسافة مـــا لتصل إلى نقطة تلامس معدنية. وفى ظهر الخلية (حيث تغطـــى طبقـــة معدنيـــة بالكامل كل السطح المتعرض) قد تكون هذه المسافة قليلة وفـــى الاتجـــاه الرأســـى

بالكامل (لا تتجاوز الميكرون) فى حين أن نقاط التلامس فى السطح الأمامى عــادة ما تأخذ شكل شبكة لتجنب التظليل (حجب أشعة الشمس). وللوصول إلـــى أصـــابع الشبكة يجب أن تتحرك حوامل الطاقة جانبا لمسافات طويلة تبلغ عدة ملليمتــرات، فتفقد مقدارًا لا يستهان به من الطاقة فى شكل مقاومة خلال هذه العمليـــة؛ ويمكــن التقليل من هذه المقاومة بتصنيع الطبقة العليا من شبه موصل ذى كثافة عالية مـــن الحاملات الحرة.

الكفاءة الكمومية Quantum efficiency:

الكفاءة الكمومية: هى واحدة من أكثر القياســات فائــدة فـــى أداء الخليـــة الشمسية. وهى مقياس لفاعلية الخلية فى تحويل الضوء ذى الطاقات المختلفة، إلـــى كهرباء. ويمتص الضوء ذو الطاقات المختلفة على أعماق مختلفـــة مـــن الخليـــة الكهروضوئية. والحاملات التى يولدها الضوء لها بطبيعتها فـــرص متباينـــة فـــى الانفصال بسبب المجال الكهربى، اعتمادا على موضع بـــدايتها بالنـــسبة للمجـــال. وتقيس تقنية الكفاءة الكمومية النسبة من الحاملات التى تسهم فى التيار الكهربى.

منحنى العلاقة بين التيار والفولتية:

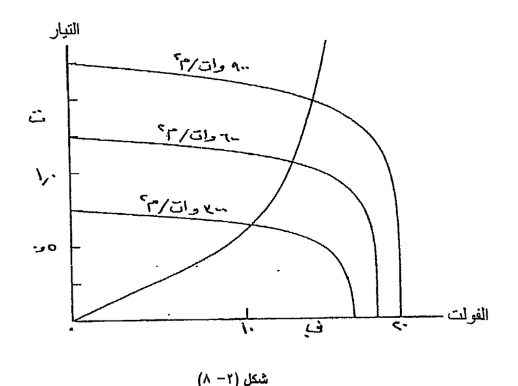
القدرة التى تنتجها الخلية هى حاصل ضرب التيار العامل والفولتية. وتحـــت ظروف القصر، يصل التيار لقيمته القصوى، إلا أن الفولتية تقرب من الصفر، ولا تنتج الدائرة أى قدرة تقريبا. وفى ظروف الدائرة المفتوحة تبلغ الفولتية أقصى قيمة ولا يمر تيار، فالقدرة الناتجة أيضا صفر. وفى مكان مـــا بـــين هـــاتين الحـــالتين الطرفيتين نحصل على ظروف أقصى قدرة، وهى التى يكون فيها كل من التيـــار والفولتية كبيرى المقدار (من ٧٠% إلى ٩٠% من قيمهمـــا العظمـــى). وتـــصمم الخلايا والمصفوفات منها بحيث تنتج الكهرباء أقرب ما تكون من نقطـــة ظـــروف

أقصى قدرة. ولا تصل أقصى قدرة مطلقا لحاصل ضرب فولتية الدائرة المفتوحة فى تيار القصر، إلا أن درجة اقتراب القدرة القصوى من حاصل الضرب هذا هى ما يطلق عليها معامل الملء **fill factor**. فمعامل الامتلاء هو مقياس لمدى قرب الخلية من الأداء الأمثل. وقد يكون لبعض الخلايا فولتية دائرة مفتوحة عالية، وتيار قصر مرتفع، إلا أن معامل امتلائها ضعيف، والنتيجة هى قدرة منخفضة وكفاءة متدنية. ويعرف معامل الامتلاء بالنسبة ما بين القدرة القصوى، وحاصل ضرب تيار القصر فى فولتية الدائرة المفتوحة. ويتخطى هذا المعامل بالنسبة للخلايا ذات الأداء الجيد ٧٠%.

الطرز الكهروضوئية القياسية:

يتكون الطراز النموذجي (القياسى) الكهروضوئى من مجموعة من خلايا السليكون المتبلر الشمسية المتصلة ببعضها. والحجم النمطى على المستوى الصناعى يصل فيه قطر البلورة الدائرية إلى ١٠٠ مم ويصل طول ضلع المربع بالنسبة للخلايا شبه المتبلورة إلى ١٠ سم. وينتج كلاهما ١ وات من القدرة الكهربية تحت الظروف الطبيعية لتعرضها للشمس. وفى مصفوفة نمطية يوصل ما بين ٣٤، ٣٦ خلية على التوالى. وتصل أقصى قدرة لمثل هذا التشكيل ما بين ٣٠، ٤٠ وات. ويبين شكل (٢ – ٨) علاقة التيار بالفولتية لطراز جهاز كهروضوئى نمطى ذى ثلاثة مستويات استضاءة فى درجة حرارة الغرفة:

ويبين الشكل بالمثل خط منحنى القدرة الأمثل، حيث يولد الجهاز أقصى قدرة عند كل مستوى استضاءة. ولخلية سليكون مفردة فولتية دائرة مفتوحة قدرها نحو ٠,٥٥ إلى ٠,٦ فولت. وعلى ذلك تنتج مجموعة من الخلايا من ٣٤ إلى ٣٦ خلية، فولتية دائرة مفتوحة مقدارها ٢٠ إلى ٢١ فولتا. ولدى مستوى استضاءة كاف تعادل فولتية القدرة المثلى ٨٠ % تقريبا من فولتية الدائرة المفتوحة،



شكل (٢- ٨)

علاقة التيار بالفولتية لطراز نمطي

من الخلايا الكهروضوئية عند ٣٠٠° كلفن

ومن ثم فإن توصيل ٣٦ خلية على التوالى يفضى إلى فولتية قدرة مثلى قدرها ١٦ إلى ١٧ فولتا. وعند درجة حرارة ٦٠° م، وهى درجة نمطية فى ظروف التشغيل الميدانية بالخلية ستهبط هذه الفولتية إلى نحو ١٤ أو ١٥ فولتا، وهى قيمة مثلى لشحن بطارية رصاصية حمضية شحنا جيدا تحت فرق جهد معتاد ١٢ فولتا، وهو ما يفسر اختيار عدد ٣٤ إلى ٣٦ خلية لتوصيلها على التوالى فى الطراز النمطى، إذ تمثل البطارية الرصاصية الحمضية أوسع الوسائل انتشارا لتخزين الطاقة كهروضوئيا. وكما يظهر فى شكل (٢-٨) تزداد فولتية الدائرة المفتوحة بشكل لوغاريتمى مع الفيض الشمسى. ولأغلب الخلايا يكون تيار القصر دالة خطية فى درجة التعرض للشمس بحيث تعطى كفاءة تتزايد لوغاريتميا مع الاستضاءة حتى نقطة يتعاظم عندها الفاقد فى مقاومات التوالى بما يقلص من هذه الكفاءة.

تأثير درجة الحرارة:

تتناقص فولتية الدائرة المفتوحة ف د.م بازدياد درجة حرارة مجموعة الخلايا، فتقل لكل خلية سليكونية مفردة بحوالى ٢,٣ مللى فولت لكل درجة. فإذا كانت (Δ د) هى الفرق بين درجة حرارة التشغيل، والدرجة المرجع **reference temp.** فيمكن التعبير عن فولتية الدائرة المفتوحة والفولتية المناظرة للقدرة المثلى (ف ث) للجهاز بالمعادلتين:

ف دم (د) بالمللى فولت = ف دم (٢٨ °م) بالمللى فولت – Δ د ×٨٢ مللى فولت

ف ث (د) بالمللى فولت = ف ث (٢٨ °م) بالمللى فولت – Δ د × ٨٢ مللى فولت

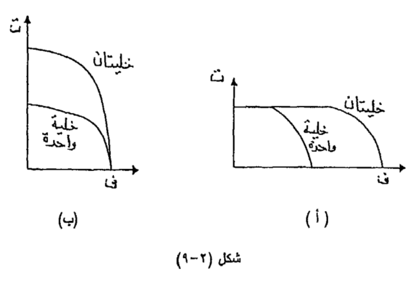
وتحدد درجة حرارة الخلية تجريبيا اعتمادا على درجة التعرض للشمس، ودرجة الحرارة السائدة، وسرعة الرياح، وأسلوب التغليف. ويمكن تطبيق العلاقة التقريبية الآتية:

درجة حرارة الخلية = درجة الحرارة السائدة + ك × الإشعاع الشمسى الساقط مقدرًا بالوات لكل متر مربع حيث ك = ٠,٠٢ إلى ٠,٠٣ درجة. م٢. وات $^{-١}$.

توصيل الخلايا الشمسية على التوالى وعلى التوازى:

يمكن الوصول إلى العلاقة بين التيار والفولتية للخلايا الموصلة على التوالى لكل تيار، بتجميع فروق الجهد للخلايا المنفردة. وعلى النقيض من ذلك تجمع قيم التيار المار فى الخلايا الموصلة على التوازى لكل فولتية لرسم الدالة الشاملة بين التيار وفرق الجهد.

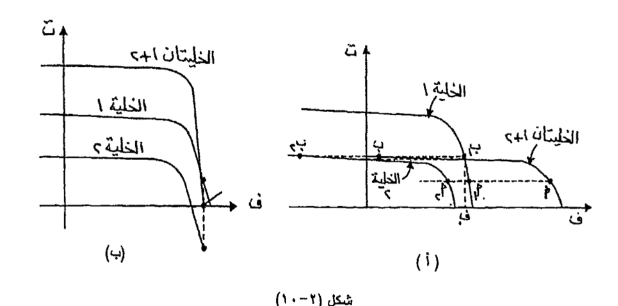
ويمثل شكل (٢-٩) حالتى توصيل خليتين متماثلتين على التوالى والتوازى بالترتيب، والقدرة القصوى المتولدة من الخليتين تساوى مجموع القدرتين المتولدتين بهما. وفى التوصيل على التوالى والتوازى تكون قيمة الفولتية المثلى والتيار الأمثل مماثلتين لمجموع القيم المثلى للفولتيات المنفردة والتيارات المنفردة على الترتيب.



شكل (٢-٩)

توصيل خليتين متماثلتين على التوالى (أ) وعلى التوازى (ب)

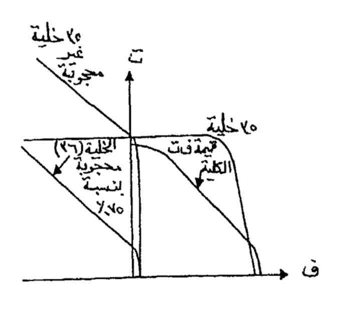
والموقف أكثر تعقيدا فى حالة خليتين غير متماثلتين لهما تيارا قصر مختلفان. واختلاف قيمة تيارى القصر قد يرجع إلى حجب الشمس عن إحدى الخليتين. ويمثل شكل (٢-١٠) المنحنى الإجمالى لعلاقة الفولت بالتيار عند توصيل خليتين على التوالى وعلى التوازى. وهناك نقطتان مبينتان على المنحنى الكلى فى حالة التوصيل على التوالى (أ، ب)، إلى جانب نقاط التشغيل المناظرة لكل خلية على حدة. ويبين الرسم بوضوح أنه لقيم ف < ف. تصبح الخلية الأضعف التى تولد أقل تيار قصر، بمثابة حمل على الخلية الأقوى، مما ينجم عنه فاقد بسبب سوء التوافق بين الخلايا ويصبح فرق الجهد عبر هذه الخلية سالبا. والخلية الأضعف فى هذه الحالة هى التى تحدد قيمة التيار الكلى فى حين أن فولتية الدائرة المفتوحة الكلية لا تتأثر كثيرا بعدم التوافق هذا، وتعادل تقريبا القيم التى نحصل عليها من التوصيل على التوالى للخلايا المتماثلة. ومن الوضوح بمكان أن القدرة الكلية المتولدة من خليتين غير متوافقتين تقل كثيرا عن مجموع القدرة التى تولدها خليتان منفردتان. وعلى ذلك لا يوصل على التوالى إلا الخلايا التى لها نفس تيار القصر. وعلى النقيض من ذلك لا يسبب التوصيل على التوازى أية مشكلة، حيث يبدو من شكل (٢-١٠ب) أن القدرة الإجمالية تضاهى تقريبا مجموع القدرتين المنفردتين.



شكل (٢-١٠)

توصيل خلايا غير متماثلة على التوالى (أ) وعلى التوازى (ب)

ويعود السبب الرئيسى فى عدم التوافق بين الخلايا إلى وقوع بعضها - جزئيا - فى الظل، الأمر الذى يكثر حدوثه خلال تشغيل الجهاز. ولحسن الحظ فلدى الخلايا المستعملة عمليا تيارات تسرب أكثر مما يبينه شكل (٢-١١)، والتيار المتسرب، والذى يمثله فى نموذج خلية شمسية مناظرة، مقاومة ضعيفة **shunt resistor** يقلل من كفاءة الخلية المفردة، غير أنه يجعل أداء المجموعة أقل حساسية إزاء عدم توافق الخلايا وتأثيرات الوقوع فى الظل. ويبين شكل (٢-١١) منحنى علاقة التيار بالفولت لوحدة مكونه من ٣٦ خلية موصلة على التوالى، منها ٣٥ خلية معرضة للشمس، وواحدة (رقم ٣٦) محجوبة عن الشمس بنسبة ٧٥%. ويمكن الحصول على منحنى علاقة التيار بالفولت الإجمالى بإضافة المنحنيات الخاصة بالخلايا المفردة حتى رقم (٣٥) للحصول على المنحنى المدون عليه (٣٥ خلية) بالشكل. ويتحقق هذا بإضافة الفولتيات المنفردة لكل قيمة تيار، ثم يضاف منحنى التيار - الفولت للخلية المحجوبة جزئيا، لنحصل على منحنى علاقة الفولت - التيار الإجمالى. وتيار القصر لهذه الخلية الأخيرة يبلغ ٢٥% فقط من تيار قصر الخلايا الـ ٣٥ المعرضة الأخرى.



شكل (٢-١١)

التوصيل على التوالى لـ ٣٦ خلية مع وجود تيار تسربى نمطى

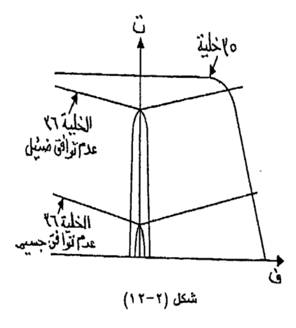
وقد افترض فى شكل (٢-١١) خلايا ذات تيارات متسربة وجدت فى وحدات صناعية نمطية. والتيارات المتسربة هذه تسبب انحدارا أو ميلا كبيرا فى المنحنى عند نقطة انعدام الفولتية (ف = ٠) لكل خلية منفردة. على أية حال حينما توصل الخلايا على التوالى فإن انحدار وصلة التوالى يقسم على عدد الخلايا. لذا فإن ميل منحنى علاقة الفولت و الأمبير فى حالة توصيل ٣٥ بطارية معرضة للشمس على التوالى (شكل ٢-١١) يقارب الصفر حول القيمة ف = ٠، فى حين أن ميلا أكبر يلاحظ فى منحنى العلاقة لخلية مفردة. وبوسعنا الآن الحصول على منحنى علاقة الفولت بالتيار الإجمالى بتجميع قيم فروق الجهد المتولدة فى البطاريات الخمس والثلاثين المعرضة للشمس – لكل قيمة للتيار – بالإضافة إلى الفرق المتولد فى البطارية الباقية (المحجوبة). ويبين الشكل بوضوح أنه نتيجة التسرب لم يعد التيار الذى تولده الوحدة تحدده البطارية المحجوبة كما هو الحال لو

لم يكن هناك تسرب. ففى هذه الحالة الأخيرة، ستقسم كفاءة الوحدة – بسبب حجب الضوء – على معامل يساوى ٤ إذا كانت هناك خلية واحدة محجوبة بنسبة ٧٥%. وفى حالة التسرب التيارى النمطى يقل النقصان فى كفاءة الخلية نتيجة حجب الضوء. وعلى ذلك فدائما ما تستعمل فى الوحدات الصناعية خلايا بها بعض التسرب فى التيار.

تكون النقطة الساخنة:

لا يتسبب عدم التوافق بين الخلايا الموصلة على التوالى فى فقدان ملموس فى القدرة فقط، ولكنه يمكن أن يفضى إلى تلف خطير فى الوحدة، ما لم تتخذ الاحتياطات اللازمة. فعدم التوافق يؤدى إلى عدم التحميل الأمثل للخلايا المختلفة. وفى بعض الأحيان تؤدى الخلية المولدة لأصغر تيار قصر، دور الحمل بالنسبة للخلايا الأخرى. وستتبدد بعض القدرة المتولدة بالخلايا عبر أضعف خلية، مما يفضى إلى ارتفاع فى درجة الحرارة ويوجد نقطة ذات جهد حرارى عال. وقد ترتفع درجة حرارة النقطة الموضعية هذه إلى الحد الذى قد يعرض غلاف الوحدة الخارجى لتلف حقيقى. وتحدث أسوأ الظروف فى وحدة يمر بها تيار قصر، حيث يتعين أن تصرف كل القدرة المتولدة داخليا. فإذا احتوت الوحدة على ٣٥ خلية متماثلة بالإضافة إلى خلية واحدة أضعف منها والجميع متصل على التوالى، فلا بد وأن تفرغ كل القدرة المتولدة عن الخلايا ال ٣٥ القوية فى الخلية الأضعف (رقم ٣٦)، لأنه ما من قدرة تنقل إلى الحمل الخارجى (ف للوحدة = ٠). وتعتمد كمية القدرة المنصرفة إلى هذه الخلية على مقدار عدم التوافق وعلى التيار المتسرب من الخلايا. ويصور شكل (٢-١٢) حالة خلايا ذات تيار متسرب صغير، ويمثل المنحنى العلوى علاقة التيار بالفولتية للخلايا الخمس والثلاثين المتماثلة، وقد أخذت فى الاعتبار حالتان للخلية رقم (٣٦) تعتمدان على مدى عدم

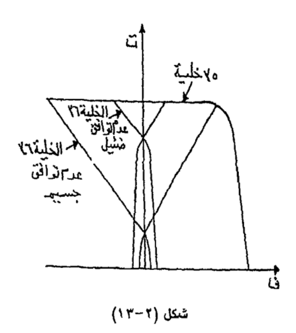
التوافق الناتــج من الحجب الجــزئى عن الشمس على سبيــل المثال. وحيــث إن ف للوحدة = . ، فبمقدورنا أن نحدد كمية القــدرة المــصرفة فــى الخليــة (٣٦) باعتبارها صورة بالمرآة لمنحنى علاقة التيار بالفولتية لهذه الخليــة مــن خـــلال تقاطعه مع منحنى علاقة التيار بالفولتية للخلايا الخمس والثلاثين المتماثلة الموصلة على التوالى، وتناظر القدرة المصرفة حاصل ضرب التيار فى الفولتية عند نقطـــة التقاطع. وكما يوضح شكل (٢-١٢) يحدث أكبر تفريغ للقدرة لدى قيمة عدم توافق صغيرة نوعا. وعلى النقيض من ذلك يحدث أعظم تصريف للقدرة مع قيمة أكبـــر من عدم التوافق (أكبر من ٨٠% فى مثالنا)، والذى يتقـــاطع عنـــده خـــط الحمـــل المناظر للخلية رقم (٣٦)، مع منحنى علاقة التيـــار بالفولتيـــة للخلايـــا الخمـــس والثلاثين الموصلة على التوالى عند نقطة الحد الأقصى للقدرة (شكل ٢-١٣).



شكل (٢-١٢)

منحنى التيار- الفولتية الداخلى والقدرة المصرفة

فى وحدة ذات تيار قصر لخلايا ذات تيار متسرب صغير



شكل (٢-١٣)

منحنى التيار – الفولتية الداخلى والقدرة المصرفة
فى وحدة ذات تيار قصر لخلايا ذات تيار متسرب ذى قيمة نمطية

وحيث إن وضع عدم التوافق الجسيم أقل احتمالا بكثير من عدم التوافق الضئيل، فإن مشكلة التجمع الحرارى وظهور نقطة ساخنة أقل إلحاحا فى الخلايا ذات تيار تسرب كبير.

ومن الأهمية بمكان – عمليا – تحديد الظروف التى تفرز حدوث مركز تجمع حرارى (نقطة ساخنة). وبحكم التعريف يناظر ذلك حالة تصل فيها الخلية إلى درجة حرارة مفرطة فى ارتفاعها (أعلى من ٨٥° م فى الظروف النمطية). وتتمثل المشكلة فى التوصل للشروط التى قد تؤدى لحدوث ذلك من حيث الفولتية والتيار الخارجيين ومستوى الاستضاءة.

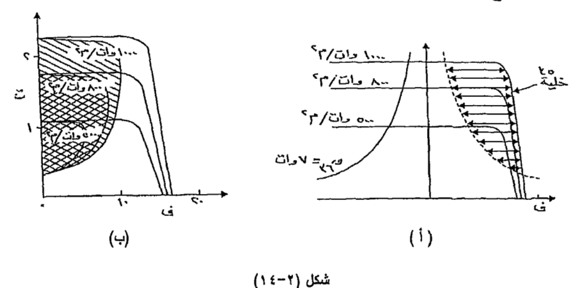
وفى ظروف التشغيل الاعتيادية دون حصول نقطة ساخنة تبلغ درجة حرارة الخلية ٦٥°م، كما تشير لذلك المعادلة، إذا افترضنا درجة حرارة سائدة قدرها ٤٠°م. وارتفاعا إضافيا فى درجة حرارة الخلية مقداره ٢٠°م بسبب تأثير عدم

التوافق من شأنه أن يولد نقطة ساخنة، حيث الوصول إلى درجة الحرارة القصوى المسموح بها وهى ٨٥ °م. وبغرض رفع درجة حرارة الخلية فوق درجة الحرارة السائدة يلزم إجراء تفريغ إضافى منتظم للقدرة فى الخلية. وتشير الحسابات النظرية والتجارب إلى وجوب تفريغ القدرة-بما بين ٦،٨ وات لكل خلية من وحدة خلايا بقطر ٤ بوصات، بهدف رفع درجة الحرارة فوق الدرجة السائدة بعشرين °م. ويعتمد ذلك على نوعية التغليف (غطاء الوحدة) وعلى سرعة الرياح. وإذا اعتبرنا حالة وجوب تسريب ٧ وات، تحدد المعادلة (ق٣٦ = ٧ وات) الشرط الحدى **boundary condition** لتكون النقطة الساخنة. وللتعرف على الظروف التى يتحقق فى ظلها الشرط (ق ٣٦ = ٧ وات) يبين شكل (٢-١٤) منحنيات علاقة الفولت بالتيار للخلايا الخمس والثلاثين المتماثلة، من منحنى للتصريف المنتظم (ق٣٦=٧ وات). دعنا فى البداية نفحص الحالة عند الاستضاءة الكاملة للخلايا الخمس والثلاثين (١ كيلو وات /م٢). فلمعرفة ما إذا كانت ستتكون نقطة ساخنة لكل قيمة للتيار عند فولتية الحمل سنأخذ فى الحسبان صورة بالمرآة للمنحنى ق٣٦ = ٧ وات (p_{36}=7w)، وهى المبينة بالشكل كخط متقطع غير متصل. وحيث إن فولتية الحمل هى مجموع الفولتيات الموجبة للخلايا الخمس والثلاثين، والفولتية السالبة للخلية رقم (٣٦)، فإن المحصلة تعطى بطول الخط المبين بالأسهم فى الشكل (٢-١٤أ).

وبتكرار ذات الخطوات مع مستويات استضاءة متعددة، وتوقيع النتائج على منحنى لعلاقة تيار الحمل مع فولتية الحمل، تحصل على شكل (٢-١٤ب)، والذى يوضح أيضا منحنى التيار والفولتية الطبيعى للوحدة. ويحدد كل منحنى نطاقا معينا للنقطة الساخنة مبينا على الناحية اليسرى، حيث يحتمل أن تتخطى درجة حرارة الخلية الحد الحرج. ومن الواضح أن احتمالية تكون نقطة ساخنة تتزايد بتزايد الاستضاءة وبنقصان الفولتية عبر الحمل. وعلى ذلك فمشكلة تكون

نقطة ساخنة أكثر إلحاحا مع التطبيقات بدون تخزين للبطارية حيث توصل وحدات البطاريات عبر أحمال متغيرة. فإذا استخدمت البطاريات فإن الوحدات (مجموعة البطاريات) تعمل بفولتية ثابتة قيمتها نمطيا ١٤ فولت، مما يجنبنا التشغيل في نطاق تكون النقاط الساخنة.

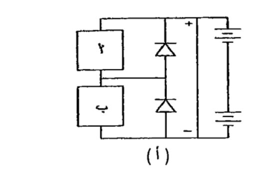
وترتفع احتمالية تكون النقطة الساخنة إذا زاد عدد الخلايا الموصلة على التوالى. ويبين شكل (٢-١٤) أن النقطة المثلى من حيث القدرة – مع التعرض الكامل للشمس – تقع على مقربة من نطاق النقطة الساخنة فى حالة مجموعة من ٣٦ خلية موصلة على التوالى. وعلى ذلك، ولضمان التشغيل بعيدا عن تكون نقاط ساخنة يجعل بعض صانعى الوحدات نهاية طرفية ثالثة لها، بحيث تقسم الخلايا الست والثلاثون الموصلة على التوالى إلى خطين يحتوى كل منهما على ١٨ خلية كما فى شكل (٢-١٥). وهنا يمكن أن يوضع دايودان مفرعان أو مجزآن على التوازى مع الخطين اللذين قسمت إليهما الوحدات (أ، ب).

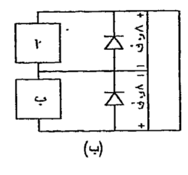


شكل (٢-١٤)

(أ) تحديد منطقة التركز الحرارى

(ب) منطقة تركز حرارى نمطى لنموذج قياسى





شكل (٢-١٥)

دور الدايود المركب على التوازى فى الحد من مشكلة تكون النقطة الساخنة

وإذا كانت مجموعة الخلايا تشحن حملا ذا فولتية كبيرة كبرا كافيا. كبطارية مثلا، فما من ميل لتكون نقاط ساخنة لأن مجموعتى الوحدات تكونان فى حالة **forward biased**(*)، ولا يلعب الديودان دورا، حيث إنهما ينحرفان بالورب فى الاتجاه المعاكس. وعلى النقيض من ذلك إذا تم قصر دائرة الوحدات، فإن الفرع (ب) ذا الخلية الأضعف ينحرف فى الاتجاه المعاكس على حين ينحرف الدايود المركب على التوازى بالورب فى اتجاه الأمام بحيث يحد الفولتية عند حد ٨٠٠ مللى فولت.

وفى وضع قصر الدائرة يكون دور الدايودين المجزأين للتيار أن يقصرا الدائرتين فى فرعى المجموعة. وبدون الدايودين يتعين أن تصرف أو تفرغ كل القدرة التى تولدها الخلايا الخمس والثلاثون المتماثلة إلى الخلية الأضعف، إذا ما قصرت دائرة أطراف المجموعة. وإذا استخدم الدايودان فينبغى أن تفرغ فقط قدرة الفرع من الوحدة التى من ضمنها الخلية الأضعف، فى حين تفرغ القدرة المولدة من الفرع الآخر فى أضعف خلية فى هذا الفرع. وحيث إن نصف القدرة فقط هى التى تدفع إلى الخلية غير المتوافقة، فإن ارتفاع درجة الحرارة يكون محدودا ويضعف احتمال تكون نقطة ساخنة.

(*) هو وضع يسمح بسريان حر للشحنات الكهربية نتيجة انخفاض المقاومة، بحيث يمكن لإلكترون أن يعبر الوصلة ويملأ فجوة قريبة منها (المترجم)

بناءً على المناقشة السابقة نستخلص أن توصيل الخلايا على التوالى أكثر حساسية من توصيلها على التوازى. ففى خط التوالى يتعين استعمال خلايا مماثلة لبعضها بقدر الإمكان لتجنب فواقد القدرة الناجمة عن عدم التوافق. وبوجه عام يقلل وجود تيار متسرب من الخلية من عدم التوافق، وبالتالى من مشكلة تكون النقطة الساخنة. ويقل تأثير وجود الظل جزئيا (أو حتى بصورة كاملة) على كفاءة لوحة البيان. وتكون مشكلة النقطة الساخنة أقل خطورة فى ظروف قصر التيار، لأن احتمال عدم التوافق الطفيف يرجح احتمال عدم التوافق الجسيم، وبالتالى فالتوفيق بين الخلايا أقل حساسية (مادام هناك تيار تسرب فإن ملامح الخلايا الموصلة على التوالى لا تحددها الخلية الأضعف).

التطورات الحديثة فى الخلايا الكهروضوئية (المواد الكهروضوئية)

غالبا ما يتحول الاختيار ما بين الكفاءة الأعلى، وتكلفة التصنيع الأقل، إلى اختيار ما بين المواد البلورية والشرائح الرقيقة منها. والأجهزة ذات البلورات أعلى كفاءة، على أن الأجهزة ذات الشرائح الرقيقة أقل تكلفة. وتجرى الكثير من البحوث على مواد التصنيع مع التركيز على السليكون البلورى والسليكون غير المتبلر، والشرائح الرقيقة متعددة البلورات والمواد من رتبة المجموعتين **III-V** ذات البلورة المفردة.

والسليكون المتبلر هو صاحب التاريخ الأطول والقاعدة التكنولوجية الأعرض، وما يزال هو المهيمن على السوق فى صناعة وحدات توليد القدرة، وهو أكثر ما تمت دراسته من بين المواد الكهروضوئية، وتقنيات استخدامه فى تطور وتقدم سريعين. وقد وصلت فنيات تصنيعه إلى مرحلة شبه أتوماتيكية، إذ تم التوصل إلى تصنيع بلورات سليكونية عالية النقاء والجودة.

إن الابتكـــارات المتعددة فى مجال البلورات الـــسليكونية تثيـــر الإعجـــاب، ففى حين كان تصنيع خلايا البلورات السليكونية يستلزم فى الماضـــى ٣٠٠ إلـــى ٤٠٠ ميكرون من المادة الممتصة، فبالمقدور الآن تصنيع خلية عاليـــة الكفـــاءة لا تزيد سماكتها عن ١٠٠ إلى ١٥٠ ميكرونًا. وما زالت أرقـــام الكفـــاءة للأجهـــزة المصنعة فى ارتفاع مطرد سواء على مـــستوى البحـــوث العلميـــة أو التطبيقـــات الصناعية. وقد وصلت كفاءة الخلايا فى نطاق البحوث إلـــى رقـــم ٢٢,٨% فـــى ظروف الضوء الشمسى المعتادة. وهناك مزاعم بأن تحسينات لاحقة فـــى المـــواد وفى التصميم سترفع الكفاءة إلى حدود ٣٠% تحت الظـــروف المعتـــادة لـــضوء الشمس، ٣٦% مع اتباع أساليب تركيزه، بيد أن هذه المزاعم تتكئ على اعتبارات مثالية لا تدخل فى الحسبان الفواقد التى يبدو ألا سبيل لتحاشيها فى الخلايا عمليـــا، مثل إعادة اندماج (أوجر)(*)، **Auger** أو اندماج بين نطاق ونطاق آخر(**)، وبعض ظواهر إعادة الاندماج فى المبتعث، والانخفاض فـــى الفولتيـــة نتيجـــة المقاومـــة الكهربية. ومع وجود هذه الفواقد – على كل حال – يمكن أن تصل كفاءة الخلايـــا السليكونية ذات الوصلة المفردة فى خاتمة المطاف ومع أسلوب تركيز الأشعة إلـــى ٣١%.

وليس رفع الكفاءة بالسبيل الوحيد الذى يتخـــذه مـــسار تطـــور البلـــورات السليكونية، فهناك مدخل آخر بالوصول لحل وسط يجمع بين الكفـــاءة وتخفـــيض تكلفة الإنتاج. والأسلوبان المتبعان لذلك هما تقنية الـــشريط **ribbon technology**، وفيها تنمى صفائح كاملة من السليكون والسليكون المصبوب، وتـــستعمل أســـاليب

(*) **Auger recombination** : هو عودة اندماج بين الإلكترون والفجوة يصحبه إشعاع كهرومغناطيـــسى ويذهب فائض الطاقة وكمية الحركة إلى إلكترون أو فجوة أخرى . (المترجم)

(**) **Band to band recombination** هو عودة اندماج يتحرك خلالها الإلكترون من نطاق التوصيل إلى داخل نطاق التكافؤ الخاوى المصاحب للفجوة (المترجم)

السكب البسيطة لتنمية كتل مربعة المقطع يتم نشرها بالمنشار إلى رقائق. ورغم أن كلا الطريقتين تؤدى إلى بلورات سليكونية متعددة ذات كفاءة أقل فإن هناك آفاقًا لزيادة إنتاجيتهما وخفض تكاليفهما، كما يمكن فيهما استخدام سليكون ذى نقاء أقل وتكاليف أقل، ونظرًا لأن الخلايا متعددة البلورات ذات المقطع المستطيل يمكن صفها داخل المجموعة بشكل أكثر كثافة من حالة الخلايا الدائرية ذات البلورة المفردة، فإن المجموعات من الخلايا متعددة البلورات لها ذات الكفاءة تقريبًا التى للمجموعات من الصفائح المسطحة من السليكون ذى البلورة المفردة.

ويستعمل المصممون لدى تصميمهم لأجهزة السليكون متعددة البلورات بعضًا من نفس التطورات المتقدمة المستحدثة مع السليكون ذى البلورة المفردة، كالانعكاس الداخلى والعاكسات السطحية الخلفية والطلاء بمواد مضادة للانعكاس – كما أفادت الأجهزة متعددة البلورات من إدخال الهيدروجين الذرى فى التقليل من عودة اندماج حاملات الطاقة التى تسببها عيوب المادة والحدود الفاصلة بين الحبيبات **grain boundaries**. وبفضل هذه التحسينات ارتفعت كفاءة الخلايا – على المستوى التجريبى إلى زهاء ١٧%.

والسليكون المهدرج غير المتبلر هو بديل رائد للسليكون أحادى البلورة أو متعدد البلورات، وقد وصلت كفاءة الخلايا ذات الوصلة الواحدة لحوالى ١٢%، وكفاءة الأجهزة متعددة الوصلات إلى نحو ١٣,٣%، كما تجاوزت كفاءة المجموعات الفرعية الكبيرة **Submodules** حد الـ ٩%.

ويتمتع السليكون غير المتبلر بامتصاصية عالية للضوء، ولا يزيد سمكه عن ١ إلى ٢ ميكرون كى يمتص ٩٩% من الضوء الساقط على فجوة نطاق قدرها ١,٧ إلكترون فولت، ويمكن ترسيب طبقات رقيقة من المادة غير المتبلرة على العديد من المواد غير المكلفة، كالصلب والزجاج والبلاستيكيات، على أن هناك عيبين أساسيين فى السليكون غير المتبلر، أولهما أن أجهزة السليكون المهدرج غير

المتبلور تفقد كفاءتها عند بدء تعرضها لضوء الشمس، فقد فقدت الأجهزة المبكـرة الصنع منها نحو ٥٠% من كفاءتها، ومنذ ذلك الحين توصل الباحثون إلى أن أحـد أسباب ذلك هو الضوء الذى تجلبه العيـوب فـى المـادة والمعروفـة بـالروابط المتهدلة(*) **dangling bonds** فى الطبقة الأصلية، لذا يـصنع بعـض المـصنعين وحدات ذات طبقات أصلية متناهية الرقة، على حين يـستعمل آخـرون خليتـين مصفوفتين من السليكون المهدرج لكل منهما طبقة أصلية غاية فى الرقة، وقد نـتج عن هذه التطويرات تقليل العيوب، بحيث لم تتخط ١٥% بالنسبة لمجموعة الخلايا، ١٠% بالنسبة للخلية المفردة.

والعيب الثانى هو تدنى الكفاءة، إلا أن تطوير أساليب التـصنيع والتـصميم والحد من عودة الاندماج فى الطبقة الأصلية والتأثير المقـاوم للموصـل الـشفاف للتيار، كفيلة بأن ترفع كفاءة الخلايا صغيرة المساحة إلى ١٥% وكفاءة فرع مـن مجموعة الخلايا إلى ما بين ١٠، ١٢%.

ومن الممكن الوصول إلى أرقام أعلى من الكفاءة باسـتعمال سـبائك مـن السليكون غير المتبلور فى الأجهزة ذات الوصلات المتعددة، ففى هـذه الأجهـزة تصف الخلايا المصنوعة من مواد مختلفة – ومن ثم ذات فجوات نطاق متباينـة – تصف الواحدة فوق الأخرى فى ترتيب تنازلى من حيث قيمة فجوة النطـاق مـع توليف كل خلية صوب قطاع مختلف من الطيف الشمسى، ومن شأن هذا التوزيـع أن يزيد من فاعلية استغلال الضوء الشمسى، ومن ثم تحسين الكفاءة، وينبغـى أن تصل كفاءة الخلايا ذات الوصلتين إلى ١٧%، وكفاءة الخلايا ذات الثلاث وصلات إلى حوالى ٢٤%.

(*) نوع من الروابط يخلق عند ترسيب معدن داخل السليكون (المترجم)

وتوفر طبقات البلورات المتعددة الرقيقة مثل ثانى سيلينيد إنديوم النحـــاس (نح ندسل٢ $CuInSe_2$)، وتيلوريد الكادميوم (كد تيل CdTe) كل مزايـا الـسليكون اللابلورى، فهى ذات امتصاصية عالية وتحتاج إلى كمية ضئيلة من المـادة، كمـا أنها طيعة لعمليات التصنيع الأوتوماتيكى، ولا تعانى من تدنى الخواص الذى يجلبه تأثير الضوء، ويمكن تصنيعها بتقنيات الترسيب التى سيتم التوسع فيها مستقبلا.

ولقد ارتفعت كفاءة وحدات مجموعات خلايا تيلوريد الكادميوم الكبيرة إلـى أكثر من ٧%، وكفاءة الخلايا ذات المساحة الصغيرة إلى ١١%، وتتخطى كفـاءة وحدات ثانى سيلينيد إنديوم النحاس ١١%، كما تشير التقارير إلى تجـاوز كفـاءة خلاياها المصنعة حديثًا حد الـ ١٤%، ويبدو كما لو أن الوحـدات ذات الوصـلة المفردة ستصل عاجلا لكسر حاجز الـ ١٥% فى كفاءتها، وقـد نحـصل علـى كفـاءات أعلى باستعمال المـواد من طائفة III-V[*]، وأشهرها زرنيخ الجـاليوم G_a As (جا.ز) وسبائكه مثل زرنيخ الجاليوم الألومنيـومى AlG_aA_s (لـو جـا ز) وزرنيخ الجاليوم الإنديومى In G_a A_s (ند جا ز).

وزرنيخ الجاليوم مادة مثالية للكهروضوئيات، إذ أن لها فجوة نطاق نموذجية (١,٤٥ إلكترون فولت) للخلايا ذات الوصلة المفردة، كما تتمتع بامتصاصية عالية، ويمكن لزرنيخ الجاليوم أن يتسابك مع كثير من المواد المتنوعة لتغيير فجوة النطاق حسب الرغبة للحصول على تشكيلات لوصلات متعددة ذات كفاءة أعلـى، ووردت تقارير بالوصول – باستعمال زرنيخ الجاليوم – إلى كفـاءة ٢٢,٤% وقـد نميـت بالجهاز طبقة سطحية من بلورة مفردة من زرنيخ الجاليوم، مما زاد مـن إمكانيـة جمع أجهزة زرنيخ الجاليوم بين الكفاءة والتكلفة الزهيدة، وقد سجلت أرقام كفـاءة خلايا زرنيخ الجاليوم ذات الوصلة المفردة تحت استضاءة شمسية مباشـرة تبلـغ

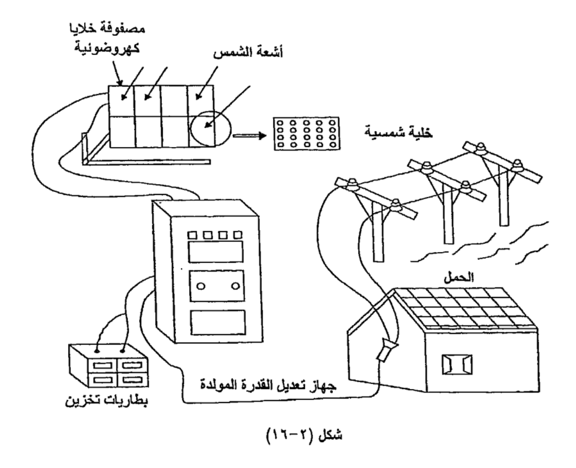
(*) هى عناصر المجموعات ٣ ، ٥ فى الجدول الدورى للعناصر .

٢٤,٣%، وتحت الضوء الشمسى بعد تركيزه ٢٩,٢%، وكان الرقم القياسى على مستوى جميع الخلايا للكفاءة هو ٣١%، لخلية من زرنيخ الجاليوم/ السليكون ذات وصلتين تحت الضوء الشمسى بعد تركيزه، ويمكن استخدام السبائك من زرنيخ الجاليوم والسبائك الثلاثية القائمة على أساس المواد من طائفة III-V فى كثير من التصميمات ذات الوصلات المتعددة التى يبشر بذلك مستقبلها، وفجوة نطاق زرنيخ الجاليوم نموذجية بالنسبة لخلية وسط فى جهاز ثلاثى الوصلات، وأفضل قرين له هو سبائك زرنيخ الجاليوم مثل زرنيخ الجاليوم الألومنيومى (لفجوات النطاق العالية)، وزرنيخ الجاليوم الإنديومى لفجوات النطاق المنخفضة، ومن شأن هذا المزيج أن يتوافق جيدًا مع أبعاد التشبيكة الذرية(*) وأن يتيح التصنيع من قطعة واحدة، كما سيعزز من احتمال الوصول إلى كفاءات فى نطاق من ٣٥ إلى ٤٠%.

محطات القوى الكهروضوئية الشمسية SPV:

يمكن أن تدمج الطاقة الشمسية الكهروضوئية فى الشبكة العمومية، كما يمكن أن تستغل فى وحدات مستقلة بذاتها، والمزج ما بين الوحدات المستقلة والربط بالشبكة العمومية يبعث مفهوم تركيب وحدات استغلال الطاقة الشمسية الكهروضوئية أعلى الوحدات السكنية، بحيث تلبى أحمال الذروة فى خلال فترات سطوع الشمس (شكل ٢ – ١٦) وتصمم مثل هذه المنظومات على وجه العموم لإنتاج ما يكفى من الكهرباء لتغطية احتياجات المساكن بالكامل على مدار العام، وعلى أية حال، فلا يلزم بالضرورة أن تلبى المنظومات المركبة فوق المساكن الاحتياجات للطاقة فى كافة الفترات الزمنية.

(*) يقصد بالتشبيكة الذرية Lattice الكيفية التى تترتب بها الذرات داخل المادة المتبلرة (المترجم)



شكل (٢-١٦)

رسم تخطيطى لمحطة توليد قوى شمسية كهروضوئية

ومحطات القوى المركزية ذات السعة المتوسطة (من ١٠٠ كيلو وات إلى ١ ميجاوات)، والأكبر منها تصمم عادة بنفس كيفية محطات القوى التقليدية، ويحـول التيار الكهربى المستمر المولد من مجموعة المحطات الشمسية الكهروضوئية فـى البداية إلى تيار متردد من خلال مقومات عكسية **invertors** بحيث يتزامن مع تردد الشبكة العمومية قبل تغذيته فيها، ولا يكون هناك عادة أجهزة تخزين منفصلة فـى حالات التوفيق مع الشبكة.

ومن ناحية أخرى، يتلاءم استخدام الوحدات الكهروضوئية الشمسية المستقلة بذاتها، مع نوعية أحمال بعينها طبقا للتصميم، وقد تكون هذه المنظومات ذات تيار مستمر أو تيار متردد وفقا للاحتياج، فإذا كانت الحاجة للأحمال الموصـفة خـلال

ساعات عدم سطوع الشمس، فيلزم إدخال أجهزة لتخزين الطاقة فـــى المنظومـــة، وتولد مجموعة المحطات الشمسية الكهروضوئية الطاقة فى خلال ساعات سطوع الشمس، وتخزن فى أجهزة التخزين لحين الحاجة إليها خـــلال ســـاعات احتجـــاب الشمس، وغالبًا ما يتكون جهـــاز تخـــزين الطاقـــة مـــن بطاريـــات (حاشـــدات) كهروكيميائية، وتلبى الأحمال فى أثناء سطوع الشمس رأسا من مجموعة المحطات الشمسية الكهروضوئية، دون أن يكون للبطاريات دور فعال فى تلبية هذه الأحمال.

توليد القوى الكهروضوئية: الآفاق المستقبلية والضوابط:

توجد آفاق مستقبلية لاستغلال القوى الكهروضوئية وحلولها محـــل طـــرق توليد القوى التقليدية على مستوى العالم ككل، كمصدر أولى للكهرباء، نظرًا لما هو متوقع من تخفيض تكلفتها بحيث تغدو منافسة لبدائل القدرة الأخرى فى التطبيقـــات من نوعية أحمال الذروة، وبوسع الطاقة الشمسية بسهولة أن تغزو هـــذا المجـــال، على أن هناك عددًا من المسائل المهمة بما فيها التكلفة، ومساحة الأرض المطلوبة، والتوفيق مع الشبكة العمومية، والطبيعة المتقطعة لمصدر الطاقة الشمسية، وكيفيـــة التخزين، مما يؤثر على سرعة اختراق الطاقة الشمـــسية الكهروضـــوئية للـــسوق وانتشارها، وتعد هذه المسائل جد جوهرية عند تقييم آفاق استغلال هذه الطاقة فـــى توليد القدرة اللازمة للأحمال الوسطية والأحمال الأساســـية لمرافـــق الاســـتهلاك المركزية، وهناك مناطق فى العالم ستـــسهم فيهـــا منظومـــات القـــدرة الشمـــسية الكهروضوئية الموصلة بالشبكات العمومية بنصيب وافر، ولكـــى تكـــون مجديـــة اقتصاديًا يتعين أن تكون تكلفة هذه الطاقة قادرة على منافسة القدرة المولـــدة مـــن خلال المصادر الأخرى.

التكلفة:

خفضت البحوث والتطوير من تكلفة إنتاج الطاقة الكهروضوئية لتهبط إلى ٠,٣ دولار أمريكى لكل كيلووات ساعة بدون تخزين، وهو ما يمثل ١/٤٠ من التكلفة سابقًا، ومن شأن هذه التكلفة أن تتقلص من خلال العمل البحثى المكثف ونشاطات التطوير، وتقع هذه التكلفة فى نطاق الأسعار السائدة التى تؤدى حاليًا لقاء القدرة فى فترات الذروة إبان أيام الصيف بالغة القيظ، وعلاوة على ذلك تقدم القدرة الكهروضوئية منافع بيئية للمجتمع، لا تظهر أهميتها فى التحليل الاقتصادى التقليدى، ولدى إدراج هذه العوامل البيئية عند التحليل الاقتصادى تصبح أسعار السوق الحالية لاستغلال الطاقة الكهروضوئية – من حيث استعمالها فى المرافق – قادرة على منافسة الكهرباء المولدة بالطرق التقليدية.

الحيز اللازم:

يلزم لمحطات القوى الكهروضوئية حيز كبير المساحة من الأراضى لتركيب مصفوفات الوحدات الشمسية، وتشير التقديرات المبكرة إلى أن محطات القوى الكهروضوئية يلزمها من خمسة أضعاف إلى عشرة أضعاف مساحة الأرض اللازمة لمحطة قوى تعمل بإحراق الفحم أو محطة قوى نووية، إلا أن تحليلا أحدث يبين أن احتياج المحطات الكهروضوئية من الأراضى يمكن مقارنته باحتياج التكنولوجيات التقليدية إذا اعتبرنا تكاليف نقل المواد المعدنية والتخلص من النفايات، وقد قيم احتياج توليد القوى الكهروضوئية بمقدار ٠,٠٨ إيكر(*) لكل جيجاوات. ساعة، فى حين يبلغ الاحتياج ٠,٠٩إيكر لكل جيجاوات ساعة فى حالة الفحم، ٠,٠٨٣ إيكر / جيجاوات ساعة فى حالة المحطة النووية.

(*) الإيكر acre وحدة مساحة تعادل ٤٨٤٠ ياردة مربعة أى حوالى ٤٠٤٣ م٢ (المترجم)

الدمج مع الشبكة العمومية:

تشترك مراكز توليد القوى الكهروضوئية الكبيرة مع منظومات شبكات توزيع القوى المتناثرة، فى نطاقين من المشاكل فيما يختص بدمجها فيما بينها، وعلاقتها بشبكة المرافق العمومية، والمشكلة الأولى وثيقة الصلة بالتقنية، فى حين ترتبط المشكلة الثانية بطبيعة الطاقة الشمسية المتقطعة.

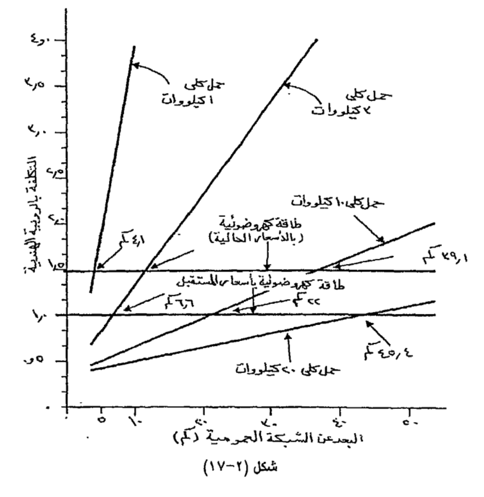
التخزين:

بعيدًا عن مشكلة تكلفة وحدات إنتاج الطاقة الكهروضوئية، فالعائق الأساسى أمام انتشار هذه الطاقة لتغطية الأحمال الأساسية هو الافتقار إلى نظام زهيد لتخزين الطاقة الكهربية المولدة خلال فترات سطوع الشمس، وذلك مع الإقرار بتحقق منافع من حيث الأمان والبيئة يوفرها استغلال الطاقة الشمسية فى تلبية الأحمال الأساسية. وعلى ذلك تكثف البحوث والتطوير جهودها بهدف التوصل إلى تقنية تخزين توافق الطاقة الكهروضوئية سواء على المدى الطويل أو القصير، ويلوح أن أقرب البدائل المبشرة لذلك على مستوى الاستخدام فى الشبكات العمومية هو التخزين فى البطاريات الرصاصية الحمضية، أو الضخ الهيدروليكى أو الهواء المضغوط، ويرجح مستقبلا أن تتطور وسائل التخزين باستخدام وسائل خلايا الوقود، وإنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربى، ومغناطيسيات الموصلات فائقة التوصيل.

اقتصاديات الطاقة الشمسية الكهروضوئية:

أجريت فى الهند دراسات عدة حول التقييم الاقتصادى لمنظومات القدرة الشمسية الكهروضوئية، رغم أن هذه الاقتصاديات تتكئ – بنسبة كبيرة – على طبيعة الاستهلاك والموضع الذى تقام فيه هذه المنظومات ومدى توفر الطاقة

التقليدية، وتظهر قدرة منظومات الطاقة الكهروضوئية على المنافسة – سعريًا – لدى المناطق التى يتراوح بعدها عن شبكة خطوط نقل القدرة ما بين ٤، ١٢ كم، إذا تراوح حجم الحمل المطلوب بين ١، ٣ كيلو وات حتى مع التكاليف الرأسمالية الراهنة لإنشاء الوحدات الكهرومائية (شكل ٢ – ١٧). وللقرى التى تبعد عن الخطوط بعشرة كيلو مترات وتصل أحمالها إلى ١٠ كيلو وات (شاملة استهلاكات إنارة الشوارع والزراعة والصناعة) تكون تكاليف الطاقة الكهروضوئية أعلى – نسبيًا – من تكاليف مد الشبكة العمومية، إلا أنه – وحتى عند هذا المستوى من الحمل – إذا بعدت القرية عن الشبكة بمسافة ٤٠ كيلومترًا أو أكثر، تصير المنظومات الكهروضوئية الأفضل اقتصاديًا، وحيث إن الطاقة الشمسية الكهروضوئية تقدم تقنية ملائمة للمناطق النائية والأقاليم التى تعانى من شح القوى المحركة، فتزودها بالكهرباء وبخدمات اجتماعية متعددة كالصحة والتعليم فى فترة وجيزة للغاية، فإن هناك مبررًا اقتصاديًا قويا للاستثمار فى تشييد منظومات الطاقة الكهروضوئية فى المناطق الوعرة، والأقاليم الصحراوية وغيرها من الرباع التى يتعذر الوصول إليها، وكذلك القرى التى لم تصلها الكهرباء بالسهول التى تبعد عن الشبكة العمومية بنحو ثمانية كيلو مترات، فهناك مساحات شاسعة من الأراضى تكتنفها مثل هذه الظروف، وعلى ذلك فمن المبرر اقتصاديًا أن توجه الاستثمارات القومية فى إنتاج القدرة الكهروضوئية على المقياس الكبير إلى تلك المناطق، فذلك أجدى من اللجوء لمصادر الطاقة التقليدية.



شكل (٢-١٧)

مقارنة بين مستوى التكلفة الحالى لمنظومات الطاقة الكهروضوئية
وتكاليف مد الشبكة العمومية لإنارة الشوارع لدى الظروف المختلفة من الحمل والمسافة

وللطاقة الكهروضوئية ميزة كبرى، وهى القصر المتناهى فى الفترة اللازمة للبدء فى إنتاجها، إذ يمكن إمداد أنأى المواقع بالكهرباء فى غضون مدة وجيزة، وكمثال، تم بالفعل إنارة ما يربو على ٤٣٠٠ قرية للهند – لم تكن الكهرباء قد دخلتها – بالطاقة الكهروضوئية الشمسية، بما غير بالفعل حيواتها، ولم يكن ميسورًا – وعلى مدى ٥ إلى ٢٠ سنة – توصيل الكهرباء لهذه القرى من المصادر التقليدية نظرًا لموقعها النائى وصعوبة الوصول إليها، وبالإمكان إقامة محطة قوى بسعة ١٠ ميجاوات فى أقل من عام، فى مقارنة صارخة مع محطات القوى التقليدية وعلى وجه الخصوص المحطات النووية.

وعلاوة على ذلك فللمنظومات الكهروضوئية عدد من المزايا بالإضافة إلى كونها مصدرًا نظيفًا ومتجددًا، فليس بهذه المنظومات أجزاء متحركة، وهو ما يجعل تكاليف صيانة محطات القوى الشمسية – من الناحية العملية – فى حكم المنعدمة، وهى ظاهرة تجلت فى تشغيل منارات المناطق النائية ومحطات الاتصال بالمرحلات Relay وفى مركبات الفضاء، ومنظومة الطاقة الشمسية تتكون من عدد من وحدات الخلايا الشمسية، بما يتيح نطاقًا عريضًا من التطبيقات بأنواعها وسعاتها المتفاوتة وبنفس التقنية ودرجة الكفاءة فى تحويل الطاقة، ويمكن إنتاج الخلايا الشمسية بأعداد كبيرة – شأنها شأن الدوائر المتكاملة فى أجهزة الترانزستور وأشباه الموصلات، ويبشر ذلك بإمكانية حدوث خفض كبير فى التكلفة، اعتمادًا على اقتصاديات الحجم(*)، مع اتساع حجم السوق، ومن المتوقع أن يؤدى التطور فى تكنولوجيا تصنيع الخلايا، وتكنولوجيا الرقائق الدقيقة المستحدثة إلى مضاعفة الانخفاض فى تكاليف إنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

تطبيقات الطاقة الكهروضوئية:

لقد استعملت الطاقة الكهروضوئية فى تطبيقات غير مألوفة، لتوليد الكهرباء للأقمار الصناعية فى الفضاء، بيد أن القيمة الحقيقية للطاقة الكهروضوئية تكمن فى احتمالاتها المستقبلية لإنتاج الطاقة على الأرض، وبتكاليف منخفضة تؤهلها لمنافسة المصادر التقليدية للكهرباء كالطاقة النووية والفحم والنفط والغاز الطبيعى.

ورغم أن الطاقة الكهروضوئية ما زالت حتى وقتنا الراهن أغلى من أن تنافس الكهرباء التقليدية بشكل مباشر، فإن جهود الباحثين تسير بها حثيثًا نحو تحقيق هذا الهدف، وحينما تصل الطاقة الكهروضوئية إلى المستوى المأمول من

(*) يشير المؤلف إلى ما هو متعارف عليه اقتصاديًا من انخفاض نفقات تكاليف إنتاج الوحدة من منتج ما بزيادة عدد الوحدات المنتجة منه (المترجم)

التطور، فإنها ستكون جديرة بإنتاج قسم لا يستهان به من الكهرباء، بما يسمح بتقليل الأعباء البيئية، وتستخدم الطاقة الكهرومائية حاليًا فى مجموعة متنوعة من التطبيقات سنناقش فيما يلى بعضًا منها.

ضخ المياه:

يمثل استعمال الطاقة الكهروضوئية لضخ المياه بالمناطق المنعزلة، تطبيقًا له أهميته من بين تطبيقاتها، فالطاقة الكهروضوئية ذات تنافسية مع كل الأساليب التقليدية لضخ المياه فى المواقع النائية حتى مع مستوى التكلفة الحالية، وتصلح الطاقة الكهروضوئية بصفة استثنائية لأغراض الرى، حيث تلزم كميات أكبر من المياه عادة مع ازدياد سطوع الشمس.

وتتراوح قدرة المنظومات الكهروضوئية لضخ المياه ما بين بضعة مئات من الواتات إلى بضعة كيلو واتات، والاستعمال الكلاسيكى للطاقة الكهرومائية لضخ المياه سائد فى مجتمعات العالم الثالث، حيث تستخدم كبديل للقوة العضلية للبشر أو الماشية، والحجم النمطى للمنظومة هو ٠,٤ كيلووات، وتتكون من مصفوفة وحدات كهروضوئية مركبة على هيكل متين، ووصلات سلكية ومفتاح تشغيل ومحرك يغذى مضخة بالتيار المستمر، وبإمكان مثل هذه المنظومة أن ترفع ٢٠٠٠٠ لتر من المياه من عمق ٧ – ٨ أمتار، ولقد وجدت الحكومة الهندية أن الوحدات الكهروضوئية تفضل استعمال الديزل كقوة محركة، فالوحدات الكهروضوئية لا تحتاج إعادة إمداد بالوقود، كما لا تحتاج إلا القليل من الرقابة فى أثناء التشغيل والصيانة، وللصيانة البسيطة غير المعقدة تكنولوجيا أهميتها القصوى فى كل هذه الاستعمالات.

تزويد القرى بالقوى المحركة:

وتطبيق آخر للطاقة الكهروضوئية هو تزويد القرى النائية فى بلدان العالم الثالث بالكهرباء، وتتنوع استعمالات هذه الطاقة فى ذلك المجال من القدرة اللازمة فى حالات العلاج الطارئة، إلى تبريد الأمصال والإنارة وتشغيل أجهزة الراديو والتليفزيون، والوحدات اللازمة لذلك جد صغيرة (١ – ٢٥ كيلووات). وفى هذا السياق غالبا ما تستعمل أجهزة ذات قدرة محدودة وكفاءة عالية – بربطها بالطاقة الكهروضوئية – مما يتيح تنوعًا واسعًا فى الخدمات التى تلبيها، وبالمثل تفضل المعدات التى تعمل بالتيار المستمر ومن ثم لا تحتاج إلى محولات.

· وفى معظم الحالات تستخدم البطاريات أيضًا لتخزين الطاقة والإمداد بها وفقًا للطلب.

وتعد الطاقة الكهروضوئية الآن ذات أسعار مفضلة فى المناطق النائية لدى مقارنتها بوحدات الديزل، إذا ما أدخل عمر المعدات فى الاعتبار، وبعد سنوات عديدة من النجاح وانتشار المعلومات الإيجابية عنها، يتنامى اليوم استخدام الطاقة الكهروضوئية فى المناطق النائية.

والسوق المتوقع لذلك فى مجال تزويد القرى بالطاقة هائل الحجم، وعلى مستوى العالم هناك ٥ مليون قرية بإمكانها استعمال الطاقة الكهروضوئية، ويعتبر إدخال هذه الطاقة بمثابة انفتاح لهذه القرى على العالم العصرى الحديث، فهى تتيح الإنارة والاتصالات التليفونية ومشاهدة التليفزيون، وكثيرًا ما تتيح الطاقة الكهروضوئية (مع وسائل التخزين فى بطاريات) فتح المدارس الليلية، تلك التى تجتذب عددًا أكبر من الدارسين وتقدم لهم وسائل مستحدثة قيمة للتعلم كالبرامج التليفزيونية التعليمية، وهو ما يستحيل تحقيقه بدون كهرباء، وزيادة الأواصر الاجتماعية، وهكذا فالطاقة الكهروضوئية ذات قدرة فريدة على تلبية احتياجات

العالم الثالث، وبوجه خاص لأولئك الأناس المحرومين من التسهيلات الحياتية التى تكفلها شبكات المرافق لعدم قدرتهم على تحمل نفقاتها بأنفسهم، وعندما تتدنى تكاليف الطاقة الكهروضوئية إلى متناولهم فى القريب العاجل، ستكون هى محور استخدامهم للكهرباء.

الاتصالات:

تستخدم الطاقة الكهروضوئية بالمثل فى تغذية منظومات الاتصالات (التليفونات والتليفزيونات وأجهزة الراديو) فى المناطق النائية، وتصلح هذه التطبيقات فى النقل عبر قمم التلال أو الجبال، حيث تتجلى ميزة المنظومات الكهروضوئية فى تخزين الطاقة فى البطاريات، على النُظم التى تستدعى التزود بالوقود أو الصيانة المكلفة.

وتكثر – هذه الأيام – البلاد التى تستعمل فيها الاتصالات التى تغذيها المنظومات الكهروضوئية، مثل:

١ – خطوط النقل الثانوية لشبكات التليفزيون والراديو.

٢ – أجهزة الإعادة أو التكرار فى التليفون الذى يعمل بالموجات الميكرونية.

٣ – كابينات التليفون المخصصة لحالات الطوارئ.

وتتباين سعات المنظومات اللازمة من بضعة واتات (لمقصورات الهاتف) إلى عدة كيلو واتات لأجهزة التكرار بالموجات الميكرونية للتليفون، وتتم كل هذه الاستعمالات بعيدًا عن الشبكة العمومية، وعادة فى المناطق النائية التى تتعرض لظروف مناخية قاسية بما فى ذلك الأمطار الغزيرة أو هطول الثلوج.

وأجهزة التكرار التى تعمل بالموجات الميكرونية من بين الاستعمالات ذات النجاح الفائق للطاقة الكهروضوئية المطبقة حاليًا، ولها بطاريات تخزين تكفل الإمداد المستمر بالطاقة، وتستعمل أجهزة التكرار بالموجات الميكرونية فى نقل المكالمات التليفونية من أفق إلى أفق فى المناطق التى تكلف فيها خطوط التليفون السلكية كثيرًا، فيكون البديل تزويد أجهزة التكرار بمولدات ديزل لا يكلف تشغيلها بالوقود قدر ما يكلف نقل الوقود بطائرة هليكوبتر (حوامة) أو وسيلة أخرى مماثلة إلى المناطق المنعزلة التى تفتقر إلى شبكة طرق، ومقصورات التليفون لإجراء المكالمات لدى الطوارئ آخذة فى الشيوع والانتشار، وهى تستعمل الطاقة الكهروضوئية، وتدعمها البطاريات، وتتصل هذه المقصورات رأسًا بدوريات أمن الطرق السريعة، وتستعمل فيها أجهزة التليفون ذات الخلايا.

الإشارات التحذيرية:

من بين الاستخدامات الطبيعية للمنظومات الكهروضوئية (المدعومة بالبطاريات) فى المناطق النائية، تغذية الإشارات التحذيرية، وهذا المجال هو أحد أكبر الأسواق الحالية للمنظومات الكهروضوئية، وتقتنى هذه المنظومات، القوات المسلحة وخفر السواحل وصناعة النفط، والأحمال الزائدة، والهيئات المشرفة على الطرق السريعة وكثير من الهيئات غيرها، وفى جميع الأحوال تستعمل بطاريات تخزين لضمان الإمداد المستمر بالطاقة، وتستعمل هذه المنظومات فى:

١ – إشارات السكك الحديدية.

٢ – إشارات الطرق السريعة التحذيرية.

٣ – صفارات الإنذار فى حالات الفيضان والحالات الطارئة الأخرى.

٤ – المنارات الملاحية الإرشادية.

٥ – إشارات تحذير الطائرات.

الرقابة عن بعد:

تستعمل منظومات كهروضوئية صغيرة (أقل من ٢٠٠ وات غالبًا) في المواقع النائية لمراقبة العديد من الظواهر، وفي كل الأحوال توجد بطاريات معاونة، ومن أمثلة مجالات استعمالها:

١ – جمع البيانات عن التلوث.

٢ – تسجيل البيانات السيزمية (الزلزالية).

٣ – المعلومات عن الطقس والمناخ.

٤ – الأحوال فوق الطرق السريعة.

وتمثل رقابة التلوث تطبيقًا آخذًا في التنامي للطاقة الكهروضوئية، حيث تؤخذ عينات من الهواء لأغراض البحوث وتحديد نوعيته، وقياس نسبة ثاني أكسيد الكربون وغيره من الغازات المسببة للاحتباس الحراري في المناطق المنعزلة، حيث يعكس تجميع البيانات متوسط أحوال جو الأرض أكثر من تعبيره عن الاضطرابات الجوية المحلية وهو استعمال آخر.

وتراقب الظروف المناخية بالمثل باستخدام أجهزة تعمل بالطاقة الكهروضوئية، فتقيس هذه الأجهزة درجة الحرارة وسرعة الرياح والمتغيرات الأخرى، وتنقل تلك المعلومات رأسًا إلى محطات الأرصاد الجوية.

السلع الاستهلاكية المعمرة:

كان استعمال الطاقة الكهروضوئية في السلع المعمرة ابتكارًا ابتدعته أساسًا الشركات اليابانية والأمريكية التي كانت في سبيلها لتطوير الخلايا السليكونية، وقد تمكنت هذه الشركات بالمثل من الإفادة من التكلفة الزهيدة للخلايا السليكونية الصغيرة والمجموعات منها لتصنيع الحاسبات اليدوية والساعات وأجهزة الراديو

ولعب الأطفال وعربات دور الملاهى وخلق سوق رائجة لها، إلى جانب الإفادة منها فى شحن بطاريات السيارات بصفة مستمرة فى حالة عدم استعمالها لفترات طويلة، والمنتج الحديث هو مروحة السيارة التى تغذى بالطاقة الكهروضوئية، وتفرغ هذه المروحة السيارة من الهواء الساخن خلال وقوفها فى الخارج، ويعتمد استعمال الطاقة الكهروضوئية فى تشغيل السلع المعمرة مستقبلا على مدى جذب هذه السلع المبتكرة للمستهلكين.

الباب الثالث

الطاقة الشمسية الحرارية

الإشعاع الشمسى:

مقدمة:

تقل كمية الطاقة الشمسية المتاحة على سطح الأرض بصورة محسوسة عن تلك التى تصل إلى طبقات الجو العليا، ويتحدد مدى النقص فى طاقة الشمس عند وصولها سطح الأرض أساسًا بحالة الجو من حيث القدرة على الإبصار خلاله، ويؤثر تركيب الجو فى الإشعاع الشمسى من خلال عمليتين: الامتصاص والتشتيت.

وتعتمد كمية الامتصاص والتشتيت التى تحدث لمكون ما من الطيف الشمسى على تركيب الجو وكذلك على الطول الموجى لهذا المكون، وفى نطاقات معينة من الطيف يغلب التشتت على الطاقة الشمسية فى حين يكون امتصاص تلك الطاقة هو الأساس لدى نطاقات أخرى.

ولم يعد ممكنًا تشبيه تعرض اليابسة للشمس بتعرضها لشعاع مفرد الاتجاه، وهو ما كان يصلح بالنسبة للإشعاع الساقط على طبقات الجو العليا، فبعض من الإشعاع الذى يتشتت بفعل الجو يجد سبيله إلى سطح الأرض فى صورة إشعاع منتشر **Diffused**، ويتكون إجمالى الإشعاع الشمسى على سطح الأرض من جزء أو مكون مباشر (أو مفرد الاتجاه)، وجزء متشتت بفعل الجو.

ويعنينا الإشعاع الذى يتراوح طوله الموجى ما بين ٠,٣، ٣ ميكرون، وهو النطاق من الطيف الذى يضم معظم الطاقة التى تشعها الشمس، وعلى كل فإن فهم طبيعة الإشعاع القادم من خارج الأرض، وتأثير الغلاف الجوى فى إضعافه،

وتأثير زاوية توجه السطح المستقبل له، لكل ذلك أهميته فـي استيعاب بيانـات الإشعاع الشمسى واستخداماته.

فيزيائيات الشمس:

الشمس عبارة عن كرة مادية من الغازات الساخنة يـصل قطرهـا إلـى $١,٣٩ \times ١٠^{٩}$ متر، تبعد عن الأرض فى المتوسط بمسافة $١,٥ \times ١٠^{١١}$ متر، وتدور الشمس حول محورها بمعدل مرة كل أربعة أسابيع على وجه التقريب، ولكنهـا لا تدور كجسم صلب متماسك، ففى حين يتم خطها الاستوائى دورته فـى ٢٧ يومًـا تستغرق مناطقها القطبية زهاء ٣٠ يومًا لكل دورة.

وللشمس درجة حرارة فعالة كجسم أسود قدرها ٥٧٦٢ على مقياس كلفـن، ودرجة الحرارة بمناطقها الباطنية تقدر بنحـو ٨×١٠^{٦} إلـى ٤٠×١٠^{٦} كلفـن، وكثافتها هناك قدر كثافة الماء مائة مرة.

والشمس فى واقع الحال بمثابة مفاعل اندماجى دائب العمل، يحتفظ بمكوناته الغازية بفعل قوى الجاذبية، وخلال عمليـة الانـدماج تقتـرن أربـع ذرات مـن الهيدروجين (أى أربعة بروتونات) لتكون نواة هليوم واحدة، وتتولد طاقـة ببـاطن الكرة الشمسية عند درجة حرارة تبلغ عدة ملايين درجة مئوية، فتنتقل نحو الخارج إلى سطح الشمس، ومن ثم تشع فى الفضاء.

ويوضح شكل (٣ – ١) رسمًا تخطيطيًا لتركيب الشمس، وتقدر نسبة ٩٠% من الطاقة المتولدة فى النطاق من صفر حتى ٠,٢٣ نق (حيث نق هنا هو نـصف قطر الشمس)، وهو النطاق الذى يحتوى على ٤٠% من كتلة الشمس، وعلى بعـد ٠,٧ نق من المركز، تهبط درجة الحرارة إلى ١٣٠٠٠٠ درجـة كلفـن، وتهـبط الكثافة إلى ٧٠ كيلو جرامًا لكل متر مكعب، وهناك تبدأ أهميـة تيـارات الحمـل

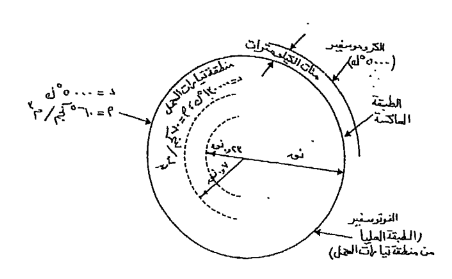
(المنطقة من ٠,٧ إلى ١ نق تعرف باسم منطقة تيارات الحمل)، وفى هذا النطاق تهبط درجة الحرارة إلى نحو ٥٠٠٠ ° ك والكثافة إلى ١٠ ⁻⁵ كجم/م³ تقريبًا(*).

والطبقة الخارجية من منطقة تيارات الحمل تسمى بالكرة الضوئية **Photosphere** وكثافة طبقة الفوتوسفير حوالى جزء من عشرة آلاف من كثافة الهواء عند منسوب سطح البحر(*)، وهى أساسًا معتمة، إذ أن الغازات التى تكونها شديدة التأين، وبمقدورها أن تمتص (أو تطلق) كامل نطاق الإشعاع، والفوتوسفير هو مصدر أغلب الإشعاع الشمسى، وتوجد أعلى الفوتوسفير طبقة من غازات أكثر برودة يمتد عمقها إلى عدة المئات من الكيلومترات يطلق عليها الطبقة العاكسة، وتقع خارجها طبقة تسمى بالكرة اللونية (الكروموسفير) عرضها زهاء ١٠٠٠٠ كيلو متر، وهى طبقة غازية درجة حراراتها تزيد يسيرًا عن درجة حرارة الفوتوسفير وذات كثافة أقل، وإلى الخارج من كل تلك الطبقات هناك الهالة الشمسية **Corona** ذات الكثافة القليلة جدًا، ودرجة حرارتها مليون ° ك، ومن ثم فالإشعاع الشمسى هو محصلة إشعاع الطبقات المتعددة التى تطلق وتمتص الإشعاع ذا الأطوال الموجية المختلفة، وقد تم – بوسائل متنوعة – قياس الإشعاع الشمسى خارج الغلاف الجوى الأرضى وتوزيعه الطيفى.

وضع الشمس بالنسبة للأرض:

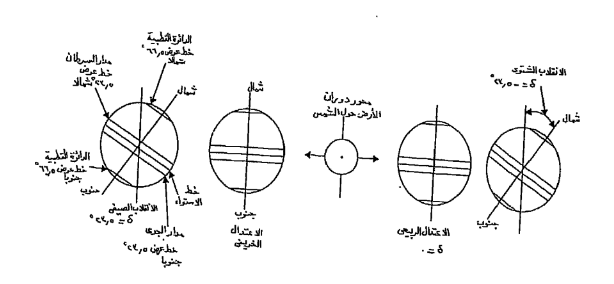
يميل محور دوران الأرض (المحور الواصل بين القطبين) بزاوية مقدارها ٢٣,٥ درجة، عن محور دائرة البروج، وهو المحور العمودى على دائرة البروج، أى على مستوى دوران الأرض حول الشمس، وهذا الميل فى محور الأرض عن الوضع العمودى على مستوى المدار حول الشمس يجعل نصف الكرة الشمالى مائلا ناحية الشمس صيفًا وبعيدًا عن الشمس شتاءً، ومن ثم تحدث التغيرات الفصلية على الأرض.

(*) كما ورد بالأصل (المترجم)



شكل (٣ – ١)

تكوين الشمس



شكل (٣ – ٢)

العلاقات الهندسية بين الشمس والأرض

ويبين شكل (٣ – ٢) الدائرة القطبية وشبه القطبيـة ومـدارى الـسرطان والجدى بالنسبة للشمس فى الفصول الأربعة.

والإشعاع الشمسى الواصل للأرض هو دالة فى الشكل الهندسى للسطح الذى يستقبله فى وضعه بالنسبة للشمس، ومن الضرورى أن نأخذ فى الاعتبار الزوايـا الهندسية المتعددة التى تحدد علاقة سـطح كـل مـن الـشمس والأرض بالنـسبة لبعضهما، ويوضح شكل (٣ – ٣) نقطة على سطح الأرض (ن) تتعرض لأشـعة الشمس.

وخط العرض ø الذى تقع عليه النقطة ن تحدده المسافة الزاوية بين النقطـة شمال أو جنوب خط الاستواء (وتعتبر موجبة فى حالة خط العرض الواقـع فـى الشمال) وهى الزاوية ما بين الخط م ن الواصل من هذه النقطة ن ومركز الأرض م، ومسقط الخط م ن على مستوى خط الاستواء.

والانحـدار الشمسى δ هو المـسافة الزاوية ما بين أشعة الشمس شمال (أو جنوب) خط الاستواء (حيث يعتبر الانحدار موجبًا فى حالة الشمال)، وهو الزاويـة ما بين المستقيم الواصل ما بين مركزى الشمس والأرض، ومسقط هـذا المـستقيم على مستوى خط الاستواء، ويتراوح مقدار الانحدار ما بين ٠ (صفر) درجة عنـد الاعتدال الربيعى، + ٢٣,٥ درجة عند الانقلاب الـصيفى، صـفر درجـة عنـد الاعتدال الخريفى إلى – ٢٣,٥ درجة عند الانقلاب الشتوى.

وتعطى المعادلة التالية الانحدار مقدارًا بالدرجات لأى يوم من أيام السنة:

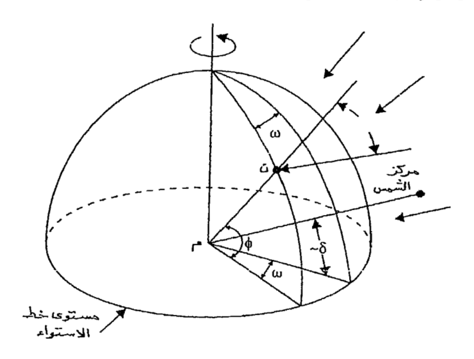
$$\delta = ٢٣,٤٥ \text{ جا } [\frac{٣٦٠}{٣٦٥}(٢٨٤ + \text{ن})].$$

حيث ن هو ترتيب اليوم فى السنة، ويعتبر الانحدار الشمسي خلال يوم مـا ثابتا فى الحسابات الهندسية، وزاوية الساعة ω لنقطة ما على سطح الأرض تعرف

بأنها الزاوية التى تدورها الأرض حتى يصبح خط الطول الذى تقع عليـه النقطـة تحت الشمس مباشرة.

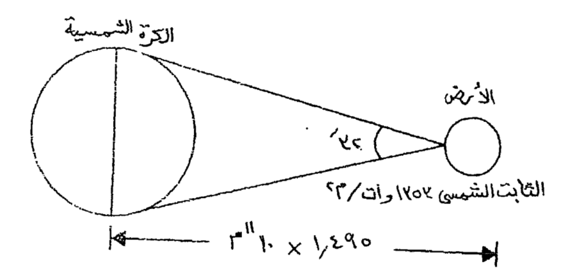
وشكل (٣ – ٣) يوضح زاوية الساعة للنقطة ن مقيسة على مستوى خط استواء الأرض ما بين مسقط الخط م ن، ومسقط المستقيم الواصل بين مركزى الشمس والأرض، وتصل قيمة زاوية الساعة إلى الصفر عند الظهيرة الشمسية محليًا، وكل $\frac{٣٦٠}{٢٤}$ (أى ١٥ درجة من خطوط الطول) تكافئ ساعة زمنية واحدة، وذلك باعتبار ساعات بعد الظهر (بعد ١٢ ظهرًا) ذات إشارة موجبة.

وعلى سبيل المثال ω = – ٣٠ درجة عند العاشرة صباحًا، ω = + ٣٠ درجة عند الثانية بعد الظهر، وزاوية الساعة بالدرجات $\omega = \pm \frac{١}{٤}$ (عدد الدقائق منذ وقت الظهيرة الشمسية المحلية)، حيث تدل الإشارة الموجبة على فترة ما بعد الظهيرة والإشارة السالبة على ما قبل الظهيرة.



شكل (٣ – ٣)

زاوية خط العرض ϕ، زاوية الساعة ω والانحدار الشمسى δ



شكل (٣ – ٤)

علاقات المسافة بين الشمس والأرض

الثابت الشمسى:

يبين شكل (٣ – ٤) رسمًا تخطيطيًا للعلاقة الهندسية بين الشمس والأرض، وبسبب لا مركزية مدار الأرض فإن المسافة بين الشمس والأرض تتغير فى مدى ١,٧%، وعلى مسافة وحدة فلكية واحدة (١,٤٩٥ x ١٠^١١ متر)، وهى متوسط بعد الأرض عن الشمس، تحصر الشمس زاوية قدرها ٣٢ (دقيقة)، وينتج عن مقدار الإشعاع المنبعث من الشمس، وعلاقتها المكانية بالأرض ثبات شدة الإشعاع الشمسى تقريبًا خارج نطاق جو الأرض.

والثابت الشمسى ث ش (G_{sc}) هو مقدار الطاقة الشمسية فى وحدة الزمن الذى تتلقاه وحدة مساحة من سطح الأرض عمودية على اتجاه انتشار الإشعاع، عند متوسط بعد المسافة عن الشمس خارج الغلاف الجوى، وتؤخذ قيمة الثابت الشمسى مساوية لـ ١٣٥٣ وات /م٢.

تعريفات مهمة:

إشعاع الشعاع الضوئى:

هو الإشعاع الشمسى المتلقى من الشمس بافتراض عدم تشتته بفعل جو الأرض، وغالبًا ما يشار إلى إشعاع الشعاع الضوئى بالإشعاع الشمسى المباشر.

الإشعاع التسربى:

هو الإشعاع المتلقى من الشمس بعد أن ينحرف اتجاهه ويتشتت بتأثير جو الأرض، ويطلق على الإشعاع المتسرب فى بعض المراجع المناخية (الإشعاع السماوى) أو (الإشعاع السماوى الشمسى).

الإشعاع الشامل:

إجمالى الإشعاع الشمسى (مجموع إشعاعى الشعاع الضوئى والإشعاع التسربى) على سطح أفقى هو ما يطلق عليه غالبًا الإشعاع الشامل.

السطوع أو التألق irradiance (وات/م٢):

هو المعدل الذى تسقط به طاقة الإشعاع على وحدة المساحات (المتر المربع).

طاقة الإشعاع irradiation (جول/م٢):

هو كمية الطاقة الساقطة على وحدة مساحات والتى نحصل عليها بعملية تكامل رياضية للسطوع بالنسبة للزمن عبر مدة زمنية معينة، عادة ما تكون ساعة أو يومًا.

(والتشمس أو التعرض للشمس **insulation**) هو مصطلح خاص بطاقة الإشعاع الشمسى تحديدًا، ويستخدم الرمز (ي) **H** للدلالة على التشمس لمدة يوم، والرمز (س) **I** للدلالة على التشمس لمدة ساعة.

التوزيع الطيفى للإشعاع خارج غلاف الأرض الجوى:

بالإضافة إلى الطاقة الكلية للطيف الشمسى (أى الثابت الشمسى) تفيدنا معرفة التوزيع الطيفى للإشعاع خارج غلاف الأرض الجوى، وباعتبار الثابت الشمسى = ١٣٥٣ وات /م٢، تكون نسب الطاقة فى النطاقات فوق البنفسجية ونطاق الضوء المرئى وتحت الحمراء كما يلى:

نطاق الطول الموجى (بالميكرون)	٠ – ٠,٣٨	٠,٣٨ – ٠,٧٨	فوق ٠,٧٨
النسبة داخل النطاق	٠,٠٧٠٠	٠,٤٧٢٩	٠,٤٥٧١
الطاقة داخل النطاق وات/م٢	٩٥	٦٤٠	٦١٨

وهكذا فإن الإشعاع الشمسى الساقط على جو الأرض له التوزيع الطيفى المبين أعلاه، والأشعة السينية، وغيرها من الأشعة ذات الطول الموجى القصير فى الطيف الشمسى تمتص بدرجة كبيرة فى طبقة الأيونوسفير بواسطة النيتروجين والأكسجين وغيرهما من مكونات الجو، ويمتص الأوزون أغلب الأشعة فوق البنفسجية، ولدى الأطوال الموجية أكثر من ٢,٥ ميكرون، يقترن إشعاع قليل من خارج جو الأرض بامتصاص قوى بفعل ثانى أكسيد الكربون والماء، مما يؤدى إلى وصول نسبة ضئيلة فقط من الطاقة للأرض، وعلى ذلك ومن وجهة نظر تطبيقات الطاقة الشمسية خارج جو الأرض لا يعتد إلا بالإشعاع ذى الطول الموجى ما بين ٠,٢٩، ٢,٥ ميكرون.

الزمن الشمسى:

هو الزمن المحسوب على أساس الحركة الزاوية الظاهرية للشمس عبر السماء، باعتبار وقت الظهيرة الشمسى هو الوقت الذى تعبر فيه الشمس خط الطول الذى يقف عليه الراصد، ولا ينطبق الزمن الشمسى مع توقيت الساعة المحلى، ومن الضرورى تحويل الزمن المحلى إلى التوقيت الشمسى بإجراء التعديل التالى:

التوقيت الشمسى = التوقيت القياسى + ٤ ($ل_{ق}$ – $ل_{م}$) + ز

حيث ز هى معادلة الزمن بالدقائق، $ل_{ق}$ هو خط الطول القياسى(*) بالنسبة لتوقيت المنطقة المحلى، $ل_{م}$ هو خط الطول فى الموقع المطلوب مقدرًا بالدرجات غربًا.

ز = ٩,٨٧ جا ٢ ب – ٧,٥٣ جتا ب – ١,٥ جا ب

حيث ب = $\frac{٣٦٠ (ن - ٨١)}{٣٦٤}$ ، ن = ترتيب اليوم فى السنة (١ ≤ ن ≤ ٣٦٥)

الكتلة الهوائية Air Mass:

هو النسبة (م) ما بين المسافة خلال الغلاف الجوى التى يمر خلالها شعاع الإشعاع وبين المسافة إذا كانت الشمس فى السمت (زاوية السمت $\Theta_{س}$ هى الزاوية المحصورة بين الخط الرأسى الواصل إلى السمت، وهو النقطة الواقعة عموديًا فوق سمت الرأس، وخط رؤية الشمس)، وعلى ذلك فعند مستوى سطح البحر، م = ١ عندما تكون الشمس فوق سمت الرأس، م = ٢ عند زاوية سمت $\Theta_{س}$ = ٦٠°. ولقيم زاوية السمت الواقعة بين صفر، ٧٠° تكون:

م = ١ ÷ جتا $\Theta_{س}$

(*) يتخذ الوقت القياسى فى الهند على أساس خط طول ٨٢,٥٠ شرقًا.

ولمقادير زاوية السمت الأعلى من ذلك، يغدو تأثير انحناء سطح الأرض ذا أثر محسوس.

الزوايا والعلاقات بينها:

إذا رمزنا بالرموز ϕ لخط العرض.

، δ الميل (زاوية الانحدار الشمسى)

، β الزاوية بين السطح المستوى محل الاعتبار والمستوى الأفقى (شكل ٣ – ٥)

γ زاوية السمت السطحية، أى الانحراف فى الإسقاط على مستوى أفقى عن الاتجاه العمودى على السطح من خط الطول المحلى، باعتبار الاتجاه للجنوب صفرًا، والاتجاه للشرق سالبًا والاتجاه للغرب موجبًا (– ١٨٠° $\leq \gamma \leq$ ١٨٠°).

ω زاوية الساعة.

θ زاوية السقوط، أى الزاوية ما بين اتجاه شعاع الإشعاع على سطح ما والاتجاه العمودى على ذلك السطح.

فتكون العلاقة التى تربط زاوية سقوط الإشعاع θ بالزوايا الأخرى فى الصورة:

جتا θ = جا δ جا ϕ جتا β – جا δ جتا ϕ جا β جتا γ

+ جتا δ جتا ϕ جتا β جتا ω

+ جتا δ جا ϕ جا β جتا ω

+ جتا δ جا β جا γ جا ω

ولسطح أفقى (β = صفرًا) ولزاوية سقوط تساوى زاوية السمت للشمس $\Theta_{س}$، نصل إلى جتا $\Theta_{س}$ = جتا δ جتا ϕ جتا ω + جا δ جا ϕ

وزاوية السمت الشمسية $\gamma_{ش}$ هى الإزاحة الزاوية بين اتجاه الجنوب واتجاه مسقط شعاع الإشعاع على المستوى الأفقى، وزاوية ارتفاع الشمس = ٩٠ – Θ = α ويمكن التعبير عن $\gamma_{ش}$ بالعلاقة:

$$\text{جا}\ \gamma_{\text{ش}} = \text{جتا}\ \delta\ \frac{\text{جا}\ \omega}{\text{جتا}\ \alpha}$$

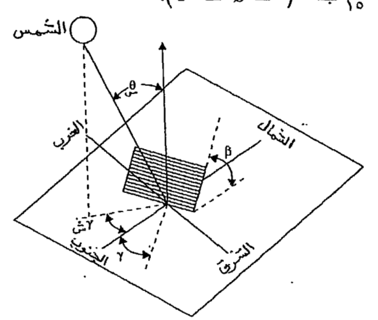
ويمكن حل المعادلة السابقة بالنسبة لزاوية الساعة لدى غروب الشمس $\omega_{\text{غ}}$، عندما تكون $\theta_{\text{س}} = 90^\circ$

$$\text{جتا}\ \omega_{\text{غ}} = \frac{\text{جا}\ \phi . \text{جا}\ \delta}{\text{جتا}\ \phi . \text{جتا}\ \delta} = -\text{ظا}\ \phi\ \text{ظا}\ \delta$$

حيث $\omega_{\text{غ}}$ موجبة لدى غروب الشمس، وحيث إن زاوية الساعة عند توقيت الظهيرة المحلى =.، فإن كل ١٥ درجة على خطوط الطول تناظر ساعة واحدة، وعلى ذلك فإن توقيت الشروق والغروب مقدرًا بالساعات، اعتبارًا من الظهيرة $= \frac{1}{15}\ \text{جتا}^{-1}\ (-\text{ظا}\ \phi\ \text{ظا}\ \delta)$.

ونستنتج كذلك أن عدد ساعات النهار يعطى بالمعادلة:

$$\text{ز} = \frac{2}{15}\ \text{جتا}^{-1}\ (-\text{ظا}\ \phi\ \text{ظا}\ \delta).$$



شكل (٣ – ٥)

زاوية السمت، والميل، وزاوية سمت السطح وزاوية سمت الشمس لسطح مائل

الإشعاع من خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى:

لإجراء الحسابات، من وجهة النظر الهندسية، فإن درجة عدم التيقن، والتباين الحادث فى أثناء الانتقال عبر الغلاف الجوى، إلى جانب القياسات المبدئية الموثوق بها، تشير جميعها إلى أن مقدار الطاقة المنبعثة من الشمس يعد ثابتًا، وتعبر المعادلة التالية عن علاقة الإشعاع من خارج الغلاف الجوى والوقت من السنة.

$$ش_{ع} = ث_{ش} \left[١ + ٠,٠٣٣ \text{ جتا } \frac{٣٦٠ \text{ ن}}{٣٦٥} \right]$$

حيث $ش_{ع}$ هو مقدار الإشعاع خارج الغلاف الجوى الساقط على سطح فى اتجاه عمودى عليه.

عند أى لحظة من الزمن يقدر الإشعاع الشمسى خارج الغلاف الجوى الواقع على سطح أفقى من المعادلة.

$$ش_{.} = ث_{ش} \left[١ + ٠,٠٣٣ \text{ جتا } \frac{٣٦٠ \text{ ن}}{٣٦٥} \right] . \text{ جتا } \theta \text{ س} \qquad (٣-١)$$

حيث $ث_{ش}$ الثابت الشمسى، ن هو ترتيب اليوم فى السنة، والمقدار $\left(١ + ٠,٠٣٣ \text{ جتا } \frac{٣٦٠ \text{ ن}}{٣٦٥}\right)$ هو الإشعاع من خارج الغلاف الجوى الساقط على سطح عمودى على الإشعاع.

$$\therefore ش_{.} = ث_{ش} \left[١ + ٠,٠٣٣ \text{ جتا } \left(\frac{٣٦ \text{ ن}}{٣٦٥}\right) \right] \left(\text{جا } \text{ø} \text{ جا } \delta + \text{ جتا } \text{ø} \text{ جتا } \delta \text{ جتا } \omega \right) \qquad (٣-٢)$$

وغالبًا ما نحتاج لحساب الإشعاع الشمسى اليومى، إلى إجراء عملية تكامل للإشعاع من خارج الغلاف الجوى على مدار اليوم على سطح أفقى (ط.)، ويتم ذلك بإجراء تكامل رياضى للمعادلة (٣-٢) عبر الفترة من شروق الشمس إلى غروبها.

فإذا ما قيس الثابت ث ش بالوات لكل متر مربع فتكون قيمة ط. بالجول / م٢.

$$ط. = \frac{٢٤ \times ٣٦٠٠ ث_{س}}{ط} [١ + ٠,٠٣٣ \text{ جتا} (\frac{٣٦٠ ن}{٣٦٥})] \times [\text{جتا } ø \text{ جتا } \delta \text{ جا } \omega_{ش} + \frac{٢ ط \omega_{ش}}{٣٦٠} \text{ جا } ø \text{ جا } \delta]$$

حيث $\omega_{ش}$ زاوية الساعة لدى الغروب بالدرجات (مع مراعاة الإشارة).

ومن الأهمية بالمثل حساب مقدار الإشعاع من خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى فى خلال ساعة بعينها، فبإجراء تكامل للمعادلة (٣-٢) لمدة محددة بزاويتى ساعة $\omega_{١}$، $\omega_{٢}$ بينهما ساعة من الزمن (حيث $\omega_{٢}$ تناظر الزمن الأطول) نحصل على:

$$س. = \frac{١٢ \times ٣٦٠٠}{ط} ث_{ش} [١ + ٠,٠٣٣ \text{ جتا } \frac{٣٦٠ ن}{٣٦٥}] \times [\text{جتا } ø \text{ جتا } \delta (\text{جا } \omega_{٢} - \text{جا } \omega_{١}) + \frac{٢ ط (\omega_{٢} - \omega_{١})}{٣٦٠} \text{ جا } ø \text{ جا } \delta]$$

مثال (١): احسب زاوية ارتفاع الشمس بعد ساعتين من الظهيرة طبقا للتوقيت المحلى فى يوم ١ يونيو لمدينة واقعة على خط عرض ٢٦,٧٥ درجة شمالا، واحسب توقيت الشروق والغروب وطول ساعات النهار.

الحل: عند الأول من يونيو، ن = ١٥٢، وتكون زاوية الميل δ حيث:

$$\delta = ٢٣,٤٥ \text{ جا } [\frac{٣٦٠}{٣٦٥} (٢٨٤ + ١٥٢)] = + ٢٢^{\circ}$$

وزاوية الساعة بعد ساعتين من الظهيرة طبقا للتوقيت المحلى = ω، حيث ω = $+ \frac{١}{٤} (١٢٠) = ٣٠^{\circ}$

وتحسب زاوية ارتفاع الشمس من المعادلة: جا α = جا ø جا δ + جتا ø جتا δ جتا ω

= جا ٢٦,٧٥ جا ٢٢ + جتا ٢٦,٧٥ جتا ٢٢ جتا ٣٠ = ٠,٩٥٣

∴ α = جا $^{-1}$ (٠,٩٥٣) = ٧٢,٣٦٤ = ٧٢,٤ ° تقريبًا

وطول ساعات النهار = $\frac{٢}{١٥}$ جتا $^{-1}$ (– ظا ø ظا δ)

= $\frac{٢}{١٥}$ جتا$^{-1}$ (– ظا ٢٦,٧٥ ظا ٢٢) = ١٠,٤٣ ساعة

ويعنى ذلك أن الشمس تشرق الساعة ١٢ – ٥,٢ = ٦,٨ أى الساعة ٦ والدقيقة ٤٨ صباحًا وتغرب الساعة ٥,٢ أى الساعة ٥ والدقيقة ١٢ مساءً.

مثال (٢): احسب الزمن الشمسى لمدينة تقع على خط الطول ٨٠,٥ ° شرقا يوم ١٥ مارس فى الساعة العاشرة وثلاثين دقيقة صباحًا طبقا للتوقيت القياسى للهند.

الحل: خط الطول القياسى بالنسبة لتوقيت الهند القياسى هو ٣٠َ ٨٢ ° (٨٢,٥ °) شرقًا، ومعادلة الوقت بالنسبة ليوم ١٥ مارس (ن = ٧٤) تعطى بالعلاقة:

ب = $\frac{٣٦٠}{٣٦٤}$ (ن – ٨١) = $\frac{٣٦٠}{٣٦٤}$ (٧٤ – ٨١) = –٦,٩

وتأخذ معادلة الوقت الصورة ٩,٨٧ جا٢ ب – ٧,٥٣ جتا ب – ١,٥ جا ب

= ٩,٨٧ جا (–٢ x ٦,٩) – ٧,٥٣ جتا (–٦,٩) – ١,٥ جا (–٦,٩)= –١٠ دقائق

ويحسب الزمن الشمسى عند الساعة ١٠، ٣٠ دقيقة وفقًا للتوقيت الهندى القياسى (ت هـ ق) من المعادلة.

ت هـ ق – ٤ (خط الطول القياسى – خط الطول المحلى) + معادلة الوقت، حيث يحسب معامل التصحيح لخط الطول من الصيغة ٤ (٨٢,٥ – ٨٠,٥) = ٨ دقائق.

فيكون التوقيت الشمسى = (١٠ س ٣٠ ق) – (.س ٨ق) – (.س ١٠ق) = ١٠ س ١٢ق قبل الظهر

مثال (٣): احسب زاوية السمت للشمس عند "لوكناو" (٢٦,٧٥° شمالا) عند الساعة ٩، ٣٠ دقيقة يوم ١٦ فبراير.

الحل: تعطى هذه البيانات ميلا **declination** قدره – ١٣,٠°

ويمكننا استعمال المعادلة جتا $\theta_{س}$ = جتا (–١٣) جتا (٢٦,٧٥) جتا (–٣٧,٥) + جا(–١٣) جا (٢٦,٧٥)

∴ جتا $\theta_{س}$ = ٠,٥٨٩

، $\theta_{س}$ = جتا$^{-1}$ (٠,٥٨٩) = ٥٣,٩١٤°

قياسات مقدار الإشعاع الشمسى المتاح:

ليس بالإمكان (من الوجهة العملية) تأسيس الحسابات عن الإشعاع الشمسى على الإضعاف الذى يحدثه به الغلاف الجوى، فالمعلومات عن الظروف الجوية نادرًا ما تتكامل، ومن ثم نلجأ إلى القياسات التاريخية عن الإشعاع الشمسى فى الموضع المطلوب للتنبؤ بأداء الشمس مستقبلاً، وتفيدنا هنا القياسات كل ساعة عن الإشعاع الشمسى على سطح أفقى، فى محاكاة العمليات الشمسية، وغالبًا ما تكون البيانات اليومية أكثر توفرًا، وبالتالى تقيم التقديرات كل ساعة على أساس هذه البيانات اليومية، وفى بعض عمليات التصميم قد تستعمل البيانات عن الإشعاع الشمسى الشهرى الكلى على سطح أفقى.

ومما يسهل المهمة تقسيم الإشعاع الشمسى إلى نطاقين من حيث الطول الموجى:

١) **الإشعاع قصير الموجة**: وهو الإشعاع الصادر من الشمس فــى نطــاق الأطوال الموجية من ٠,٣ إلى ٣ ميكرون.

٢) **الإشعاع طويل الموجة**: وهو الإشعاع القادم مــن مــصادر ذات درجــة حرارة تقارب درجات الحرارة السائدة وعلى ذلك فله طول موجى أكبر من ٣ ميكرون، وينبعث هذا الإشعاع طويل الموجة من الغلاف الجــوى عن طريق مجمع أو أى جسم آخر فى درجات الحرارة السائدة.

وتنقسم أدوات قياس الإشعاع الشمسى إلى الأنواع الثلاثة الآتية:

١) **بيرهليومتر Pyrheliometer**: وهو أداة تقــيس الإشــعاع الوافــد مــن الشمس، ومن المنطقة الصغيرة من السماء التى تحــيط بالــشمس (أى الإشعاع الحزمى **beam radiation**) فى ظروف السقوط العمودى.

٢) **البيرانومتر**: وهو أداة لقياس الإشعاع الشمسى الكلى فى نــصف الكــرة الأرضية (أى إشعاع الحزمة + الإشعاع المتشتت) على ســطح أفقــى عادة، وإذا ما حجب عنه الإشــعاع الحزمــى بواســطة حلقــة مظللــة **Shading ring**(*) فإن البيرانومتر يقيس الإشعاع الانتشارى.

٣) **مسجل درجة سطوع الشمس**: ويستعمل هذا المسجل لرصــد ســاعات الشمس الساطعة، وساعات السطوع المتألق (الوقت الذى يكــون فيــه قرص الشمس مرئيًا) تفيدنا فى تقدير الإشعاع الشمسى المتوسط علــى المدى الطويل.

(*) حلقة من النحاس أو الفضة تركب حول مادة حديدية كمغناطيس كهربى تعمل عمــل الملــف الثــانوى، حيث تتولد بها قوى كهرومغناطيسية (المترجم)

قياس الإشعاع الشمسى المباشر الساقط عموديًا باستعمال البيرهليومتر التعويضى لأنجستروم:

فى الهند، غالبًا ما يستعمل البيرهليومتر التعويضى لأنجستروم Angstrom Compensation Pyrheliometer لقياس شدة الإشعاع الشمسى المباشر، وقد شيد ك. أنجستروم هذا البيرهليومتر لأول مرة عام ١٨٩٣ ثم عدل من خلال عدة تطويرات منذ ذلك الحين، ويوجد بالجهاز عضو استشعار مثبت بالطرف الأسفل لأنبوبة، ومزود بأغشية، بحيث يكون سطح الاستشعار – عندما توجه الأنبوبة صوب الشمس – عموديًا على المستقيم الواصل من الشمس إلى جزء الاستقبال، فلا يتلقى عضو الاستشعار إلا الإشعاع الوافد من الشمس، ومن حلقة ضيقة من مساحة السماء، ويقوم بتحقيق هذه الاستقامة جهاز رؤية يسمى الديوبتر.

أساس عمل البيرهليومتر التعويضى لأنجستروم:

بيرهليومتر أنجستروم التعويضى هو أداة قياسية عيارية لقياس الإشعاع الشمسى المباشر، حيث تمتص طاقة الإشعاع شريحة معدنية مطلية بالسواد ومعرضة لأشعة الشمس، وتقاس الطاقة بمقياس التيار الكهربى اللازم لتسخين شريحة معزولة مماثلة لها، إلى نفس درجة الحرارة، وحيث إن الشريحتين مركبتان بنفس الكيفية ولهما نفس درجة الحرارة فإن التبادل الحرارى بينهما وبين الجو المحيط بهما متماثل، ومعدل تولد الحرارة فى الشريحة المعزولة نتيجة للتيار الكهربى يعادل معدل امتصاص الشريحة المعرضة لطاقة الإشعاع. والتحقق من التكافؤ أو عدم التكافؤ فى درجة حرارة الشريحتين يتم بواسطة ازدواجين حراريين حساسين مركبين بظهرى الشريحتين، وموصلين على التوالى مع جهاز جلفانومتر حساس، ويقاس التيار المار عبر الشريحة المعزولة بدقة ملليمترية أى إلى مستوى

المللى، وميزة هذه الأدوات هى أن التيار المناظر المار خلال الشريحة المعزولة لا يتأثر بالتغيرات فى وتيرة الفقد الحرارى من الشريحتين بشرط أن تؤثر التغيرات عليهما بصورة متعادلة.

ومن الناحية النظرية فهى أداة مطلقة فى القياس لأن كل العوامل ذات العلاقة اللازمة لحساب شدة الإشعاع يمكن قياسها:

فإذا كانت ش = شدة الإشعاع الشمسى المباشر بالوات / سم٢

س = مساحة الشريحة.

α = معامل امتصاص **absorptance** الشريحة.

م = مقاومة الشريحة الكهربية.

ت = التيار المسبب للتسخين بالأمبير.

فإن ش س α = م ت٢

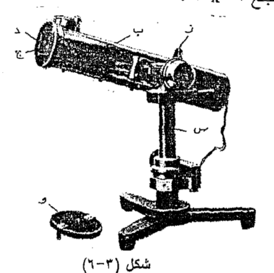
أى أن ش = $\frac{\text{م ت}^2}{\text{س } \alpha}$ = ك. ت٢ وات /سم٢

حيث ك = $\frac{\text{م}}{\text{س}\alpha}$ مقدار ثابت للجهاز، يمكن حسابه بدلالة المقاومة وطول الشريحة وعرضها ومعامل امتصاصها.

على أية حال، نادرًا ما يحدد الثابت من الناحية العملية بهذه القياسات، نظرًا لعدم تماثل الشرائح أساسًا وللفرق الطفيف فى أسلوب تسخينها. لذا يحدد ثابت الجهاز فى الواقع بمقارنته بأجهزة معيارية أخرى ذات ثابت يمكن نسبته إلى مجموعة المعايير القياسية المحفوظة لدى مركز قياسات الإشعاع العالمى بسويسرا **World Radiation Centre**.

وصف الجهاز:

يوضح شكلا (٣ – ٦)، (٣ – ٧) تفاصيل تركيب الجهاز، حيث يتكون البيرهليومتر أساسًا من شريحتين رقيقتين متماثلتين من مادة المانجانين Manganin(*) (أ١، أ٢)، ومركبتين بنفس الكيفية ومطليتين بمادة سوداء خاصة ذات امتصاصية عالية للغاية، وتتعرض أحدهما للإشعاع الشمسى فى حين تعزل الأخرى عن الإشعاع ويتم تسخينها كهربيًا إلى نفس درجة حرارة الشريحة المعرضة، وتبلغ أبعاد الشريحتين ٠,٠٢ مم سمكًا، ٢ مم عرضًا، ٢٠ مم طولاً، ومثبت على سطحيهما السفليين وصلتان حراريتان ص١، ص٢ من مادتى النحاس الأحمر والكونستانتان(**) وإن كانت الوصلتان معزولتين كهربيًا عن الشريحتين، والشريحتان مركبتان جنبًا إلى جنب فى أسفل أنبوبة مطلية بالنيكل (ب) تحتوى على عدة أغشية قرصية diaphragms. وتضمن هذه الأغشية ألا يقيس الجهاز إلا الإشعاع من الشمس ومن حلقة دائرية ضيقة من السماء محيطة بها، وأبعاد فتحة الجهاز المستطيلة تبلغ °٦ x °٣.

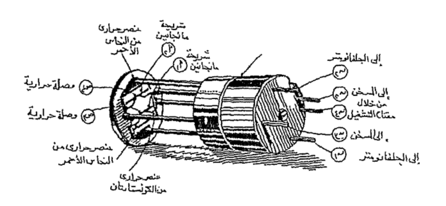


شكل (٣-٦)

جهاز بيرهليومتر أنجستروم

(*) المانجانين Manganin: سبيكة من المنجنيز والنحاس والنيكل (المترجم)

(**) الكونستانتان Constantan: سبيكة مقاومة من النحاس والنيكل (المترجم)



شكل (٣ – ٧)

تفصيل مكونات جهاز بيرهليومتر لأنجستروم

وفى واجهة الأنبوبة (ب) هذه توجد الفتحة المستطيلة (جـ) وكذلك غطاء غالق **Shutter** (د)، يسمح للإشعاع بأن يسقط بالتناوب على الشريحتين، والأنبوبة ككل مثبتة بإحكام على هيكل ثلاثى جاسئ (س) مزود بجريدة مسننة وترس مسنن، بما يتيح للجهاز أن يدور فى كلا الاتجاهين السمتى والعمودى، ويمكن توجيه البيرهليومتر بمنتهى الدقة بحيث يواجه الشمس وذلك بضبط الجريدة والترس المسننين أفقيًا ورأسيًا، إلى أن تقع صورة الشمس على علامة محددة على جهاز الديوبتر (ز)، ويستخدم الغطاء (و) فى إبقاء الفتحة الأمامية مغطاة ومن ثم فى حماية السطح الحساس فى حالة عدم استعمال الجهاز.

ويحمل طرف الأنبوبة (ب) الأسفل خمس نهايات طرفية (شكل ٣ – ٧) وتتصل النهايتان ن$_{١}$، ن$_{٢}$ بالنهايتين الحرتين للجزء النحاسى من الازدواج الحرارى، فى حين يتصل الطرف ن$_{٣}$ بقطعة من النحاس الأصفر تصل ما بين شريحتى المانجانين فى إحدى الطرفين وبالنهايتين ن$_{٤}$، ن$_{٥}$ فى الطرف الآخر من الشريحتين، وتستخدم النهايات ن$_{٣}$، ن$_{٤}$، ن$_{٥}$ فى توصيل الشريحتين أ$_{١}$، أ$_{٢}$ بدائرة التيار الكهربى الذى يقوم بالتسخين، فيمر التيار خلال الشريحة أ$_{١}$ عند توصيل

النهايتين ن ٣، ن ٤ بدائرة التسخين، وخلال الشريحة أ٢ عند التوصيل بالنهـايتين ن ٣ ن ٥، وهناك ناقل للتحويل للدائرة الخارجيـة لتوصـيل إمـا ن ٤ أو ن ٥ بـدائرة التسخين.

التشغيل اليدوى لبيرهليومتر أنجستروم مع منظومة قراءة البيانات خارجيا:

خذ البيرهليومتر خارج المبانى وثبته على سطح أفقي ووجهه صوب أشـعة الشمس مباشرة بالاستعانة بنظامى الضبط الأفقي والعمودى إلى أن تقـع صـورة الشمس على العلامة التى على الشاشة مع مراعاة الاحتفاظ بمنظومة لوحة قـراءة البيانات (شكل ٣ – ٨) فى مكان ظليل.

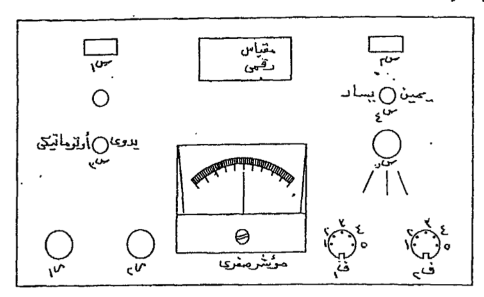
النهايات الخمس المتصلة بأطراف البيرهليومتر والملحومـة فـى النهايـة الأخرى إلى موفق أو وصلة التوليف **adaptor** ذى خمسة بنوز متلائمة مع خمس فتحات موجودة بلوحة قراءة البيانات، والآن أدخل المهايئ أو الموفق فى الفتحة أو المقبس (ف١) أو (ف٢) وارفع الغطاء الأمامى لأنبوبة البيرهليـومتر وأدر غطـاء الغالق حتى وضع المنتصف بحيث يقع إشعاع الشمس على كلا الشريحتين.

صل منظومة قراءة البيانات إلى مصدر التشغيل، شغل المفتـاح رقـم س١، ومع الاحتفاظ بمفتاح تيار المقارنة س٢ فى وضع الإغلاق صل المفتاح س٥ بالبنز ب١ وصل المفتاح س٣ بوضع التشغيل اليدوى.

قد يبين المؤشر خطأً صفريًا، أى انحرافًا عن وضـع الـصفر الـذى فـى المنتصف، أعد ضبط البيرهليوميتر على خط مستقيم نحو الـشمس، وبالاسـتعانة بجهاز قياس فرق الجهد ر١ أضبط المؤشر على وضع الصفر.

والآن حرك غالق البيرهليومتر بمقدار ٩٠° ناحية اليسار، وفى ذات الوقـت حرك المفتاح س٤إلى اليسار، وشغل مفتاح تيار المقارنة س٢، سيسرى الآن تيـار عبر الشريحة اليسرى، اضبط قيمة التيار بمساعدة الريوستات (المقاومة الكهربيـة

المتغيرة) ر٢ بحيث يشير مؤشر الانحراف إلى الصفر، سجل قراءة العداد الرقمـــى الذى يشير إلى قيمة المللى أمبير ولنسمها ت١، سجل التوقيـــت القياســـى بالمكـــان لأقرب دقيقة.



شكل (٣ – ٨)

لوحة بيانات البيرهليومتر

حرك غطاء الغلق بمقدار ١٨٠° ، بحيث تحجـــب الـــشريحة اليمنـــى عـــن الشمس، وفى ذات الوقت حرك المفتاح س٤ إلى جهة اليمين، أضبط الريوستات ر٢ إلى وضع الصفر للمؤشر واقرأ العداد الرقمى، ولتكن قراءته ت٢.

ويتعين أن تتجه أنبوبة البيرهليومتر فى أثناء القياسات دائمًا نحو الشمس.

حرك الغطاء الغالق مرة أخرى ١٨٠° بحيث تحجب الشريحة اليسرى ثانية عن الشمس وحرك المفتاح س٤ إلى اليسار بحيث يمر التـــسخين عبـــر الـــشريحة اليسرى، اضبط القراءة – عن طريق الريوستات ر٢ – على الصفر وسجل قيمـــة التيار ت ٣.

من واقع القيم ت ١، ت ٢، ت٣، تحسب شدة الإشعاع الشمسى من الصيغة:

التيار المتوسط ت = ١/٤ (ت ١ + ٢ت٢+ ت٣).

عند ضرب مربع هذه القيمة ت ٢بالأمبير بثابت الأداة (ك)(*) نحصل على ش، شدة الإشعاع الشمسى المباشر مقدرًا بالسعر لكل سم٢ لكل دقيقة أو بالوات/سم٢، اعتمادًا على ما إذا كان الثابت ك مقدرًا بوحدات سعر / سم٢ دقيقة، أمبير٢ أم بالوات / سم٢. أمبير٢.

ينبغى ألا يفصل البيرهليومتر من المقبس ف١ إلا بعد غلق مفتاح التوصيل بالمصدر س١. قبل إعادة نظام القراءة ضع المفاتيح س٢، س٥ فى وضع الإغلاق.

التشغيل التلقائى لنظام القراءة:

باتباع نفس الخطوات التى اتبعت فى حالة التشغيل اليدوى، حرك المفتاح س٣ إلى وضع التشغيل التلقائى **Auto**، واضبط مؤشر العداد على الصفر.

أدر غطاء غلق البيرهليومتر والمفتاح س٤ كليهما إلى اليسار، وشغل مفتاح تيار المقاومة س٢.

سيمر تيار المقارنة تلقائيًا عبر الشريحة اليسرى وستعدل قيمته تلقائيًا حتى تصل الشريحتان إلى نفس درجة الحرارة، وستظهر قيمة تيار المقارنة على العداد الرقمى، أدر غطاء الغلق إلى اليمين، وحرك المفتاح س٤ فى ذات الوقت إلى اليمين واقرأ قيمة تيار المقارنة على العداد، وبطريقة مماثلة خذ قراءة للشريحة اليسرى.

(*) سبق الإشارة إلى أن هذا الثابت يعتمد على مقاومة الشريحة وأبعادها ومعامل امتصاصها (المترجم)

جهاز البيرانومتر:

قياس الإشعاع الشمسى الإجمالى الشامل:

يستعمل جهاز البيرانومتر فى قياس الإشعاع الشامل الوافد من الشمس والسماء على سطح أفقى، ويتكون من سطح رقيق مطلى باللون الأسود، مثبت داخل غلاف سميك نسبيًا ومصقول صقلاً جيدًا، وعند تعرضه للإشعاع الشمسى ترتفع درجة حرارة السطح الأسود، إلى أن يتساوى معدل فقدانه للحرارة نتيجة الأسباب المختلفة، مع معدل اكتسابه للحرارة عن طريق الإشعاع، ويولد هذا الارتفاع فى درجة الحرارة قوى دافعة كهربية يمكن قراءة مقدارها وتسجيلها بواسطة جهاز مللى فولتمتر.

ويتركب السطح الحساس من ثرموبيل(*) **Thermopile** دائرى متعدد الوصلات على شكل سلك ملتف ومطلى باللك(**) الضوئى الأسود من نوع بارسون **Parson**، وتركب الوصلات الفعالة أو الساخنة على امتداد حلقة بالجهة العلوية من السطح الحساس، فى حين تبقى الوصلات الخاملة أو الباردة فى اتصال حرارى جيد وإن كانت معزولة كهربيًا عن قاعدة الجهاز الثقيلة نسبيًا، وفرق درجات الحرارة ما بين الوصلات الساخنة والباردة، دالة فى الإشعاع الساقط على السطح الحساس.

وبالصقل الجيد لكل من الغلاف السميك والسطح الخارجى، تظل درجة حرارة القاعدة الثقيلة منتظمة فى حين يغطى السطح الحساس بقبتين زجاجيتين نصف كرويتين لهما نفس المركز، بما يكفل وقايته من الرياح والمطر، ويقلل من الميل لتكوين تيارات حمل.

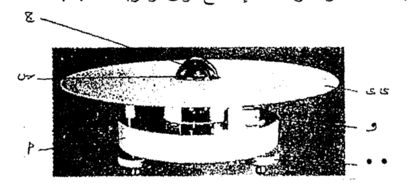
(*) الثرموبيل **Thermopile**: جهاز لقياس تغير كمية الحرارة والتيار المتولد (المترجم)

(**) اللك **Lacquer**: مادة طبيعية أو اصطناعية لصقل السطوح وإكسابها بريقًا عاليًا (المترجم)

وصف الجهاز:

البيرانومتر:

يبين الشكلان (٣ -٩، ١٠) تفصيلات مكونات البيرانومتر، فالجزء (س) هو السطح الحساس المطلى بالسواد والذى تحميه قبتان زجاجيتان ذاتا مركز مشترك (ج) قطراهما ٣٠، ٥٠ ملليمترا، والقبتان مصنوعتان من زجاج صوانى خاص ذى صفات ممتازة من حيث نقل الإشعاع الشمسى، والثرموبيل مركب داخل فراغ أسطوانى (د) داخل غطاء من النحاس الأصفر المصمت (أ)، ويخرج طرفا السلكين الكهربيين من الثرموبيل من خلال أنبوبتين (ن ن) والغطاء (و)، والسطح العلوى لصندوق الجهاز (ص) بين القبتين الزجاجيتين مصقول صقلاً جيدًا للتقليل من امتصاص الإشعاع، وبقية أجزاء الجهاز محمية من الإشعاع المباشر بتركيبها عند مركز لوح دائرى واق (ى ى) قطره ٣٠ سم ومطلى بطلاء أبيض، والسطح العلوى للصفيحة الواقية فى نفس مستوى سطح الثرموبيل المطلى بالسواد بالضبط، وعلى ذلك فإن درجة حرارة الصندوق تعادل درجة الهواء المحيط أو تقاربها، وهى أكثر تجانسًا مما لو تعرضت لإشعاع قوى أو ربما متذبذب.



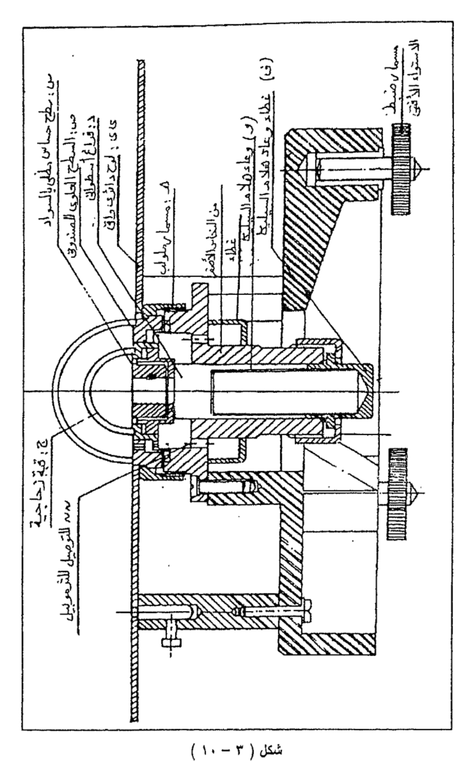
شكل (٣ – ٩)

البيرانومتر الكهروحرارى

ج: قبة زجاجية — و: ميزان تسوية كحولى

س: سطح حساس مطلى بالسواد — ب: مسمار لضبط الاستواء الأفقى

ى ى: لوح واق — أ: غلاف من النحاس الأصفر



شكل (٣ – ١٠)

تفاصيل تركيب البيرانومتر الكهروحرارى

ويمكن ضبط منسوب السطح بدقة عن طريق ثلاثة مسامير ملولبة (ب) وعن طريق ميزان تسوية كحولى دائرى، ومن الممكن توصيل أجزاء البيرانومتر الداخلية بإناء محتو على مادة مجففة كالسيليكا الهلامية **Silica gel** مما يحفظ داخل الجهاز فى حالة جافة ويمنع تغبش الكرتين الزجاجيتين من الداخل من جراء تكثف الرطوبة، وتركب أطراف الوصلات الكهربية – معزولة عن الهواء – داخل الأنبوبتين ن ن ورأس المسمار الملولب هـ هـ، وفوق حشو من حلقة مطاطية مما يجعل الغرفة (د) بمجملها معزولة جيدًا عن الهواء.

جهاز التسجيل:

يستعمل جهاز قياس فرق الجهد فى تسجيل قراءة البيرانومتر، ويتراوح مدى المسجل بين ٠، ١٠ مللى فولت ويبلغ عرض ورقة تسجيل الرسم البيانى ١٦٠مم ومعدل حركتها المعتادة ٢٠ مم لكل ساعة.

اختيار الموقع:

جهاز البيرانومتر:

من الأهمية بمكان تركيب البيرانومتر فى مكان مفتوح، وفى وضعية لا يكون هناك معها حائل يعترض أشعة الشمس على تعاقب الفصول وما بين وقت شروق الشمس وغروبها، ومن الأفضل ألا يحول حائل بين الجهاز وبين السماء حتى خط الأفق فى جميع الاتجاهات، ويتعين الاهتمام على نحو خاص، بألا يزيد ارتفاع أى حائل ما بين الشمال الشرقى والجنوب الشرقى، وبين الشمال الغربى والجنوب الغربى عن ٣ درجات، وأفضل بديل لتحقيق ذلك هو منصة ملائمة أو عمود مناسب ينصب على سطح علوى مستو لمبنى لا توجد حوله عوائق فى شكل أشجار أو بنايات مرتفعة تحجب الإشعاع الآتى من أى قسم من السماء، ومع هذا الانتقاء لأفضل المواقع يجب مراعاة اختبار الجهاز وضبطه على فترات مناسبة.

جهاز التسجيل:

ينبغى أن يركب جهاز التسجيل فى حجرة أو على جدار أو منضدة بعيدًا عن أى مصدر لاهتزازات ملموسة، وأن يحمى من الزيت والماء والغازات المسببة للتآكل الكيميائى وما إلى ذلك وأن يحتفظ به بعيدًا – ما أمكن – عن الغبار، ويجب ألا تسلط الشمس عليه مباشرة فى أى وقت ولا أن يوضع على مقربة من محركات أو محولات كهربائية مما يولد مجالات كهرومغناطيسية ضخمة تتداخل معه، كما يتعين الاحتفاظ به بعيدًا عن المشعات أو المصادر الحرارية المختلفة، كما ينبغى الحفاظ على درجة حرارة الحجرة فى حدود ٢٠ – ٣٠° م، ويجب تحاشى الغرف التى تتعرض لتباين شديد فى درجة الحرارة على مدار اليوم، ويتعين توافر مصدر كهربائى أحادى الطور (٢٢٠ فولتا) قرب المسجل.

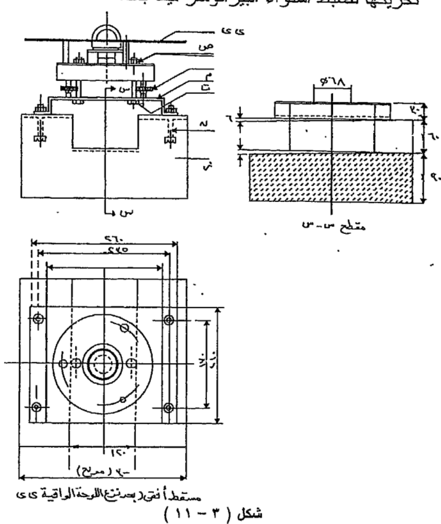
التركيب:

جهاز البيرانومتر:

تلزم لتركيب البيرانومتر منصة أفقية (ز) مربعة (٣٠ x ٣٠ سم) بارتفاع ١٥ سم وذات فجوة داخلية (شكل ٣ – ١١)، وذات جيوب بالقاعدة الخرسانية يمكن أن تستوعب أربعة مسامير رأسية (ن)، ويجب السماح بإمكانية إمالة كافية للمنصة العليا فى جميع الاتجاهات حتى يمكن تلافى تراكم مياه الأمطار عليها، وينبغى أن تستعمل صفيحة التركيب (م) التى تورد مع الجهاز كنموذج أو قالب لتثبيت المسامير فى المنصة، وبعد تجصيص مسامير القاعدة الخرسانية الأربعة فى مكانها المخصص كما بالشكل يتم تركيب البيرانومتر وفقًا للخطوات التالية:

أ) طرفا نهايتى البيرانومتر مغلفان داخل جراب بلاستيكى، صل الطرفين أولا إلى ناحية من وصلة الخزف الصينى (البورسلين) (شكل ٣ – ١٢)، وصل الناحية الأخرى من الوصلة إلى الكوابل التى تصل لجهاز التسجيل، اعزل الوصلات بشمع البارافين أو أية مادة أخرى جيدة العزل عن ظروف الطقس، ضع الوصلة تحت قاعدة الجهاز.

ب) ضع البيرانومتر – بالحرص اللازم – على صفيحة التركيب (م) (شكل ٣ – ١١)، وثبت المسمارين (ت) من النحاس الأصفر من أسفل، ضـــع الصواميل (ص) فى مكانها، مع عدم إحكام ربطها للنهاية بحيث يمكـــن تحريكها لضبط استواء البيرانومتر فيما بعد.



شكل (٣ – ١١)

تثبيت البيرانومتر (الأبعاد بالمليمتر)

ب: مسمار ضبط الاستواء الأفقى   ى ى: اللوحة الواقية

م: لوحة التركيب   ن: مسامير الأساس

ت: مسامير من النحاس الأصفر (١٠ مم قطرًا x ١٠٠ مم طولاً)

ص: صواميل من النحاس الأصفر   ز: المنصة

جـ) ضع هلام سليكا جديدًا (أو معادا تنشيطه) فى الوعاء (و) (شــكل ٣ – ١٠)، وتأكد من إحكام غلق الغطاء (ف) فوق الوردة المطاطية، وثبــت المسمار الملولب (هــ) من أسفل.

د) ضع صفيحة التركيب والبيرانومتر على مسامير الخرسانة الأربعــة ن، وأحكم الرباط على الصواميل، أدر لوالب ضبط اســتواء البيرانــومتر حتى يوضح ميزان التسوية الكحولى الدائرى تمام الاستواء بحيث تكون قاعدة الجهاز (وبالتالى سطح الثرموبيل الحساس) فى وضع أفقى تمامًا، أحكم الآن ربط الصواميل ص، مع الاحتفــاظ بــرأس المــسمار (ت) بمفتاح الربط.

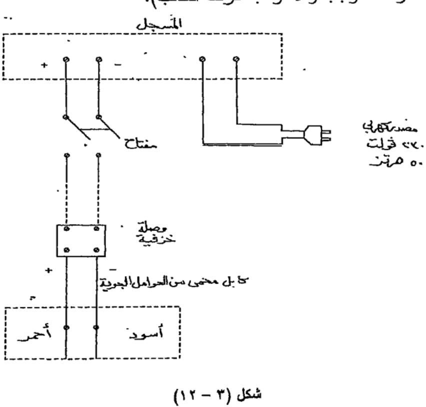
هـ) ضع صفيحة الحفظ الدائرية ى ى فى موضعها واربطهــا لولبيًــا إلــى الأعمدة الثلاثة الحاملة لحماية كافة أجزاء الجهاز – فيما عدا الثرموبيل – من الإشعاع المباشر، ولكى تعزل أى إشعاع غير مرغوب فيه مــن أسفل المستوى الأفقى، وبذلك يكون البيرانومتر معدًا للتسجيل.

المسجل:

يصمم جهاز التسجيل بحيث يركب على طــاولة (أ) مختفيًا داخل الحــائط، إلا أن الأفضل تركيبه على جدار على ارتفاع حوالى ١,٣ م ليتيسر تشغيله.

وتفصيلات التوصيلات الكهربيــة يوضــحها (شــكل ٣ – ١٢) فيوصــل البيرانومتر – عبر موصل موضوع فى قاعدة الجهاز، وزوج من الكوابل المحمية من العوامل الجوية لهما طول مناسب من نــوع (٣ / ٠,٠٢٩) إلــى الــصندوق الطرفى فى مؤخرة جهاز التسجيل من خلال مفتاح تشغيل يسمح بفصل الجهاز عن المسجل إذا لزم الأمر فى أى وقت.

وليست المسافة بين المسجل والبيرانومتر بذات أهمية من الناحية الكهربيـــة، إلا أن خفض تكاليف الإنشاء يقتضى أن يكون المسجل أقرب ما يمكن إلى البيرانومتر قدر ما تسمح الظروف العملية، ويتعين أن تمد التوصيلات الكهربية بعناية فائقة، بحد أدنـــى من الوصلات العارية المكشوفة، ومن الأهمية بمكان حماية الأسلاك مـــن الرطوبـــة، ولأجل ذلك يتعين أن يركب السلك المعزول عن الظروف الجوية بحيث لا ترتكز أيـــة أثقال لا فوق وصلة البورسلين ولا فوق مفتاح التـــشغيل الثنـــائى، وتكـــون أطـــراف البيرانومتر قد سبق توصيلها بموصل البورسلين فى وقت التركيب، يؤخـــذ جـــزء ذو طول مناسب من الكابل المزدوج من موصل البورسلين ويوصل بمفتاح التشغيل، الذى قد يكون مثبتاً على نفس اللوحة التى ركب عليها المسجل، والآن صل مفتاح التـــشغيل بنهايتى طرف المسجل كما هو مبين بشكل (٣ – ١٢) مع مراعاة القطبيـــة الـــسليمة (الأحمر بالطرف الموجب والأسود بالطرف السالب).



شكل (٣ – ١٢)

التوصيلات الكهربية

المقادير الثابتة الخاصة بالجهاز:

يزود البيرانومتر بشهادة معايرة تبين مردود البيرانومتر بالمللى فولت / سعر / م٢ دقيقة وبالميكروفولت / مللى وات / سم٢، فعلى سبيل المثال إذا كان معامل المعايرة لجهاز ما = ٤,٥ مللى فولت / سعر / م٢ / ق أو ٦٤,٦ ميكروفولت / مللى وات / سم٢، فإن لوحة بيان الانحراف الكلى (وهى مقسمة إلى ١٠٠ قسم) للمسجل وتناظر ١٠ مللى فولت، ستناظر ٢,٢٢ سعر / سم٢ / دقيقة أو ١٥٥ مللى وات / سم٢، وستناظر الخانة الواحدة من خريطة البيان مقدار ٠,٠٢٢٢ سعر / سم٢، دقيقة أو ١,٥٥ مللى وات /سم٢.

التشغيل:

كلا البيرانومتر والمسجل جهاز حساس يتعين التعامل معه بكل عناية، فلابد – بداية – من دراسة الجهاز بدقة والتعرف على كل الأجزاء المكونة له جيدًا، ويراعى الاحتفاظ بباب المسجل مغلقًا ومؤمنًا دومًا، فيما عدا أوقات تغيير خرائط البيان وما إلى ذلك، ويجب توقيع علامات توقيتية مرتين يوميًا طبقًا للتوقيت الظاهرى المحلى (فى الساعة ١٠٠٠ والساعة ١٦٠٠ مثلاً)، مع فاصل زمنى قدره ٥ – ٦ ساعات بين العلامتين، وذلك بالضغط على زر إعادة العداد للصفر، وينبغى تسجيل توقيت العلامتين على خريطة البيان ذاتها.

الصيانة:

لابد من إجراء الصيانة لكل من البيرانومتر والمسجل بكل عناية ودقة فى ظروف من النظافة التامة، نظف كلا الجهازين يوميًا، بمسح الزجاجتين للبيرانومتر بقطعة قماش ناعمة، إذ أن أى غبار أو قاذورات أو مياه عليهما سيدخل عنصرًا من عدم التأكد على البيانات المسجلة.

ينبغى أن يختبر البيرانومتر من وقت إلى آخر عدة مرات فى اليوم الواحـد، وبصفة خاصة فى أعقاب هطول المطر، ولابد من تجفيف زجاج القبتـين بقطعـة قماش جافة وناعمة بعد المطر أو الضباب وصقله بقطعة من الموسـلين النـاعم، ويجب كذلك التأكد من استقرار القبتين الزجاجيتين فى مكانهما وتثبيتهمـا إذا لـزم الأمر.

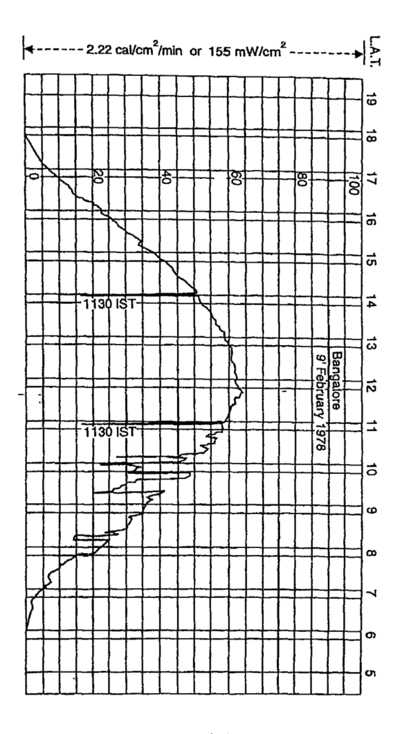
يجب فحص هلام السليكا كل أسبوع والاستبدال به، وذلـك لتجنـب تلـف الوصلات الحرارية بفعل الرطوبة وتجنب أى تكثف فى الهواء الفاصل بين القبتين، فمن شأن ذلك أن يحدث عدم تأكد فى التسجيلات المتحصل عليها، وهلام السـليكا المحتوى على كلوريد الكوبالت كمؤشر (فهو أزرق اللون وهو جـاف، وذو لـون وردى وهو مبلل) هو المستعمل كمادة مجففة مع الإناء من النحاس الأصفر (و) فى شكل (٣ – ١٠)، وبالإمكان رفع المجفف من الوعاء بفك قلاووظ (برغى) الغطاء ورفع الوعاء من الأنبوبة، ويجب إعادة تنشيط هلام السليكا كلما لوحظ تكاثف على زجاج القبتين وتحول الهلام إلى اللون الوردى، ولإعادة تنشيط مادة التجفيف تسخن بهدوء على موقد أو تحت مصباح كهربائى قدرة ١٠٠ وات إلى أن تستعيد المـادة لونها الأزرق، أى إلى أن تزول منها الرطوبة، ويستمر فى تقليب الهلام لـضمان انتظام تسخينه مع مراعاة عدم المغالاة فى التسخين أكثر من اللازم، وبعـد ذلـك تترك لتبرد فى الإناء المحكم غير المنفذ للهواء الذى وردت فيه، والذى يتعـين أن يبقى مغلقًا إبان التبريد، وبعد أن تبرد ترفع المادة المجففة التى أعيد تنشيطها وتنقل مباشرة إلى الوعاء. ولابد من مراعاة أنه كلما زاد تكرار تعرض المـادة المجففـة للهواء الرطب زادت الحاجة إلى تكرار عملية إعادة تنشيطها. ويجـب أن يحـتفظ بالوعاء محكم الغلق دوما قدر الإمكان وأن تبدل حلقة الوعاء المطاطية كلما دعت الحاجة لذلك، كما ينبغى تعريض المجفف لمدة طويلـة للهـواء الخـارجى قبـل الاستعمال!

اختبر مجموعة الأسلاك كل ستة أشهر، أو على الفور إذا ما ارتبت في وقوع خطأ ما. افصل الكابل عن مفتاح تشغيل المسجل وعن الموصل الخزفي. ومع الاحتفاظ بالنهايتين منفصلتين، قس مقاومة العازل بين السلكين، إذ يتعين أن تزيد القراءات كثيرا عن ١٠ ميجا أو م، ويستعمل لهذا الغرض مقياس مقاومة لمولد ذى فرق جهد عال. وينبغى عندئذ توصيل القلبين معا عند نهاية البيرانومتر وقياس المقاومة بين القلبين عند المسجل. ويجب أن تتساوى المقاومة مع المقاومة المحسوبة للكابل وفى حدود فرق ضيق لا يزيد عن ± ٢%.

تأكد من العزل المحكم لوصلات الكابل إلى الموصل الخزفى بشمع البارافين بعد توصيل التوصيلات. ومن المستحسن اختبار معايرة البيرانومتر على فترات منتظمة.

تسجيل النتائج فى صورة جداول:

يحسن جدولة النتائج بالسرعة الممكنة بمجرد رفع الخريطة البيانية من المسجل. ويتعين حساب كمية الإشعاع كل ساعة وكذلك كميته اليومية الإجمالية من التسجيلات المتحصل عليها معبرا عنه بالسعر / سم ٢ لكل ساعة ولليوم ككل. ويمثل شكل (٣-١٣) عينة من الرسم البيانى لبيرانومتر. والخطوط المبينة للساعات تناظر الوقت الظاهرى المحلى، ومدى الانحراف الكلى المقسم إلى ١٠٠ قسم يناظر ٢,٢٢ سعر / سم٢. دقيقة أو ١٥٥ مللى وات / سم٢ لهذا الجهاز (١ سعر / سم٢. دقيقة = ٦٩,٧ مللى وات/ سم٢). ويعبر عن الوقت – فى كل حسابات الإشعاع – بالتوقيت المحلى الظاهرى. ورغم أن التوقيت الواقعى غير ذى بال فى حسابات القيم الكلية للإشعاع على مدار اليوم، فلا بد من إعطاء سماح للفرق بين التوقيت القياسى للهند والتوقيت المحلى الظاهرى عند حساب القيمة اللحظية للإشعاع، أو للإشعاع خلال ساعة.

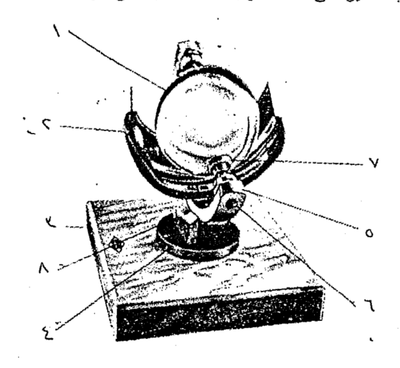


شكل (٣-١٣)

عينة من رسم بيانى لبيرانومتر

مسجل سطوع (نورانية) الشمس:

يتركب جهاز تسجيل درجة سطوع الشمس (شكل ٣-١٤) من كرة زجاجية (١) مركبة فى وعاء من النحاس الأصفر (٢) له أخاديد تودع فيها بطاقات التسجيل. وتترك الكرة أثرا على البطاقة عند تعرضها للشمس بحيث يدل طول هذا الأثر رأسا كمقياس على مدة سطوع الشمس. والمسجل مركب فوق قاعدة رخامية (٣)، والوعاء النحاسى مرتكز على قضيب شبه دائرى من النحاس الأصفر (٥) ودعامة (٤). والكرة مثبتة عند نهايتها بمسامير محوية من النحاس الأصفر تتوافق مع مجارٍ محفورة فى الكرة. وللوعاء (٢) ثلاث مجموعات من الشقوق لتستقبل ثلاث مجموعات من البطاقات، وهى إما بطاقات منحنية طويلة للرصد فى الصيف، أو بطاقات منحنية قصيرة فى الشتاء، أو بطاقات مستقيمة فى فترات الاعتدالين.



شكل (٣-١٤)

جهاز تسجيل درجة سطوع الشمس

التركيب:

اختيار الموقع:

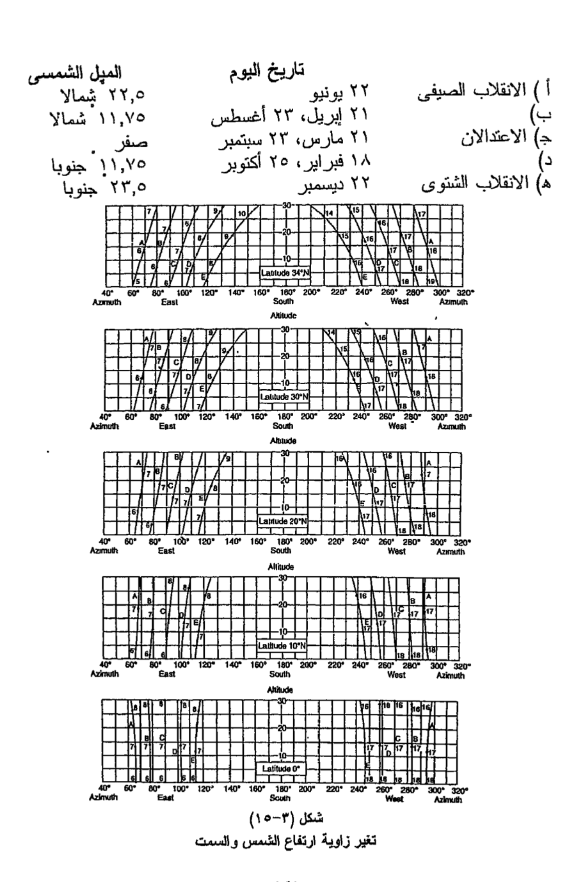
عادة ما يركب جهاز تسجيل سطوع الشمس فوق سطح بناية، حيث لا توجد حوائل دون الشمس فى أى وقت من ساعات النهار ولا فى أى وقت من السنة. ويستلزم التعرض المستمر دون انقطاع للشمس أفقا حرا مفتوحا بين الشرق والشمال الشرقى، وبين الشرق والجنوب الشرقى (على الجانب الشرقى)، وبين الغرب والشمال الغربى، وبين الغرب والجنوب الغربى (من الجهه الغربية)، وهذه هى الحدود التقريبية لمواقع شروق الشمس وغروبها لدى خطوط العرض المارة بالهند. والنطاقات اللازمة أكثر اتساعا إلى حد ما فى شمال شبه القارة الهندية عن جنوبها. ولا يسمح بوجود أى حائل جهة الجنوب يحول دون الشمس الساطعة خلال فترات أدنى ارتفاع لقرص الشمس فى منتصف النهار فى شهر ديسمبر. ويتحقق هذا الشرط إذا كانت علاقة المسافة بين الجسم وارتفاعه عن موقع مسجل سطوع الشمس تخضع للاعتبارات التالية:

عند خط عرض ٣٥° شمالا: المسافة = ضعف الارتفاع على الأقل.

عند خط عرض ما بين ١٠،٢٠° شمالا: المسافة = الارتفاع على الأقل.

وهذه الأرقام نسب تقريبية وتطبق فى حالة وجود الجسم إلى جهة الجنوب بالضبط من الجهاز. ولابد من زيادة النسبة ما بين المسافة والارتفاع بدرجة ملائمة إذا وقع الجسم ناحية الشرق أو الغرب من الجنوب الجغرافى. ويوضح شكل (٣-١٥) المعلومات الدقيقة لمتطلبات التعرض للشمس لدى خطوط العرض المختلفة بالهند، حيث يعطى الارتفاع والسمت الشمسى عند أزمنة السنة المختلفة ولدى خطوط العرض ما بين، ٣٤° شمالا، مع ساعات النهار طبقا للتوقيت المحلى الظاهرى المرقم على المنحنيات. والمنحنيات أ،ب،جـ،د،هـ، تناظر توقيتات العام المبينة فيما بعد:

	تاريخ اليوم	الميل الشمسى
أ) الانقلاب الصيفى	٢٢ يونيو	٢٢,٥ شمالا
ب)	٢١ إبريل، ٢٣ أغسطس	١١,٧٥ شمالا
جـ) الاعتدالان	٢١ مارس، ٢٣ سبتمبر	صفر
د)	١٨ فبراير، ٢٥ أكتوبر	١١,٧٥ جنوبا
هـ) الانقلاب الشتوى	٢٢ ديسمبر	٢٣,٥ جنوبا



شكل (٣-١٥)

تغير زاوية ارتفاع الشمس والسمت

وأفضل الطرق لتقييم مدى ملاءمة الموقع، قياس المنسوب الزاوى والاتجاه الزاوى true bearings للأشياء الممكن رؤيتها من الموقع. وباستعمال بوصلة وجهاز قياس الانحدار clinometer، قس المناسيب الزاوية و الاتجاهات الزاوية عبر قيم نطاق سمت الشمس المعطاة بشكل (٣-١٥). وإذا لم يزد امتداد الزاوية التى يحصرها الجسم عن ٣° فى نطاق سمت الشمس المبين بشكل (٣-١٥) عند خط العرض الواقعة عليه المحطة، فالموقع ملائم ويفى بالغرض. وإذا كانت الأجسام التى تعترض أشعة الشمس على مقربة فيمكن تحسين ظروف الموقع بتركيب المسجل على عمود من الطابوق أو على دعامة متينة يكفى ارتفاعها لتجنب هذه العوائق. ويتعين أن يسمح الارتفاع المختار للعمود بمعاينة المسجل وتغيير بطاقاته بالسهولة الواجبة.

الدعامة:

يجب أن تكون الدعامة التى يركب عليها الجهاز ذات متانة كافية، ومصنّعه من مادة غير معرضة للانفتال أو التشوه. وإذا أتيح موقع مناسب للتعرض للشمس وقريب من سطح الأرض فإن عمودا من طابوق البناء أو الخرسانة ذا مقطع مربع طول ضلعه ٣٦ سم يفى بالغرض. ويختار ارتفاع العمود المناسب، وعادة ما يصل هذا الارتفاع إلى ١,٢ م، وينبغى أن تواجه جوانب العمود الأربعة، الجهات الأصلية الأربع. والدعامة المقامة فوق سطح بناية ينبغى أن تبلغ من الارتفاع ما يكفى لتجاوز أى عوائق قريبة تحجب الشمس. وتثبت القاعدة فى العمود عن طريق قطاعين حديديين طول كل منهما ٣٣سم ومقطعه مربع طول ضلعه ٢,٥ سم، وأربعة مسامير تثبيت قاعدة قياسيين (١٠مم) طول كل منهما ١٥سم، وأربع علب أنبوبية قطرها الخارجى ١٥مم وارتفاعها ٤٢ مم.

وتدفن مسامير التثبيت بداية فى العمود إلى عمق حوالى ٥سم (داخل طوب البناء أو الخرسانة)، على بعد حوالى ٤سم من ناحيتى العمود الشمالية والجنوبية،

٨ سم من ناحيتى الشرق والغرب. ويسوى عندئذ السطح العلوى للعمود بالأسـمنت بحيث يكون ناعما وأفقياً قدر الإمكان.

الضبط:

والآن وقد تم انتقاء الموضع الملائم للمسجل، وتم تثبيته فيه جيدا بالمسامير الأربعة، لابد أن يوضع المسجل فى وضع متماثل فوق سطح العمود وتضبط القيم من حيث خط العرض وخط الطول الجغرافى والاستواء الأفقى. وسنجد أن الجهاز يجب أن يخضع للشروط الآتية إذا ما أريد منه أن يعطى تسجيلات مضبوطة:

أ) ينبغى أن يتحد مركزا الكرة ووعائها.

ب) المستوى الذى يحوى محـور التماثـل الطـولى المركـزى للبطاقـة المخصصة للاعتدالين، وهى فى مكانها من المـسجل ينبغـى أن يمـر بالمركز المشترك للكرة الزجاجية ووعائها وأن يتطابق مع مستوى خط الاستواء السماوى.

جـ) المستوى الرأسى المار بمركز الكرة، والذى يمر بمحور تماثل الوعـاء لابد أن ينطبق مع مستوى خط الطول الجغرافى. ويقتضى هذا – بالمثل أن يوجه الوعاء فى اتجاه الشرق – الغرب.

د) الطول المحلى الأساسى للكرة الزجاجية ينبغى أن يتساوى مع – أو يزيد قليلا عن نصف قطر الوعاء مقيسا حتى سطح بطاقة التدوين.

هـ) لدى وضع بطاقة ما فى مكانها ينبغى أن تكون خطوط الساعة المطبوعة عبرها فى مستويات خطوط الطول للكرة السماوية، والتى تناظر زوايا الساعة ١٥°، ٣٠°، ٤٥°، إلخ... مقيسة بالنسبة لخط الطول الجغرافـى. جرينتش ويتم التأكد من الشرطين الأخيرين خلال التصنيع، أما الشروط

الثلاثة الأولى فيتحقق الأول منها فى المصنع إبان مرحلة الاختبار، ويتحقق الآخران خلال تركيب الجهاز بالمحطة.

ضبط الاستواء الأفقى:

إنه لأمر جوهرى – قبل ضبط استواء الجهاز، أن يضبط بقدر معقول استواء سطح الدعامة التى سيركب عليها الجهاز وأن تكون الدعامة ذات متانة كافية، ولضبط استواء الجهاز ضع ميزان تسوية مضبوطًا عبر بوقى الوعاء، مع مراعاة الدقة فى ضبط محور المستوى فى اتجاه الشرق – الغرب تمامًا، وأفضل الطرق للتحقق من ذلك بتثبيت بطاقة بالمسجل، وملامستها بميزان كحولى من الجهتين، أدخل قطعًا رقيقة من شرائح قصديرية بين القاعدة والعمود حتى تستقر الفقاعة الهوائية عند مركز ميزان التسوية. عندئذ ضع ميزان التسوية على القاعدة فى الاتجاه من الشمال للجنوب واضبط حتى الوصول للاستواء الأفقى، ويتعين التأكد من الضبط الأول مرة أخرى بعد الضبط الثانى، وتعاد الخطوات كرة أخرى – إذا لزم الأمر – حتى تتحقق من دقة عمليتى الضبط كليهما.

ضبط تطابق مركزى الكرة والوعاء:

يجرى هذا الضبط بالمصنع فى أثناء اختبار الجهاز للتحقق من انطباق مركزى الكرة ووعائها، ويجب ألا يختل هذا الانطباق بحال، ولا يمكن التأكد من تحققه بصورة مرضية إلا باستخدام أداة قياس لمركز الكرة ولا ينبغى الاعتماد فى هذا الشأن على مجرد المراقبة البصرية. وعند استلام مسجل درجة سطوع الشمس بالمحطة تكون كرته منزوعة ومحفوظة فى شكل مستقل، ولوضع الكرة فى مكانها، ثبت واحدًا من أطباق الكرة (٧) فى المسمار المحوى النحاسى ثم اربط على المسمار السفلى (٦) حتى تستقر الكرة بإحكام بينهما، والآن أحكم رباط صامولة التثبيت السفلى، ولا يجوز – بأى حال من الأحوال – العبث بهذا الربط

المحكم للمسمار العلوى أو لصامولة التثبيت (هناك ملحوظة تحذيرية بهذا المعنى ملصقة بالمسمار العلوى). وعلى أية حال، إذا كان ثمة شك فى صحة تطابق مركزى الكرة ووعائها، فيمكن تصحيح هذا الخلل بأداة قياس تطابق المراكز، والتى يمكن الحصول عليها – على سبيل الاستعارة من مصنع الجهاز، وتتكون أداة قياس تطابق المركز من شريحة معدنية مقوسة يمكن حشرها فى الوعاء فى موقع بطاقة الاعتدالين، ومثبت على الشريحة قوسان متعامدان على بعضهما البعض يزيد نصف قطر كل منهما بمقدار ١ مم عن نصف قطر الكرة، وتوضع أداة القياس فى الوعاء، بحيث يقع القوس المنتصب عموديًا فوق علامة وقت الظهيرة المبينة بالوعاء، وتسجل حينئذ المسافة من الكرة إلى القوسين، وتحرك أداة القياس مسافة ما إلى اليسار وإلى اليمين ويعاد تدوين الرصد، وإذا لم تكن هناك حاجة إلى ضبط التمركز بين الوعاء والكرة، فيجب أن يتساوى بعدا القوسين عن الكرة فى جميع الأماكن (بمسافة بينية ١ مم)، وإذا ما احتاج وضع الكرة لضبط، فيمكن تغيير مركزها على طول الخط الذى يصل بين مسمارى التثبيت، وذلك بحل رباط صواميل التثبيت التى تحكم من وضعها مكانها وحل رباط أحد المسمارين مع ربط الآخر. أحكم رباط صامولة التثبيت قبل أن تعيد التأكد من سلامة الوضع بواسطة أداة القياس لمنع أى زحزحة إضافية تالية، وإذا استدعى الأمر رفع الكرة من الوعاء لأى غرض، فلابد من مراعاة أن يتم حل رباط مسمار واحد فقط، فقد يفقد التطابق بين مركزى الكرة ووعائها إذا حل رباط المسمارين معًا.

الضبط بالنسبة لخط العرض:

يمكن تعديل وضع الوعاء بالنسبة للقاعدة بحل رباط المسمارين (٨) اللذين يمسكان بلوحة المراجعة فوق الدعامة (٤)، وبتحريك القضيب النحاسى شبه الدائرى (٥) الذى يحمل المقياس الدال على خط العرض حتى تشير علامة السهم فوق التدريج إلى القراءة السليمة لخط العرض الذى به المحطة. أحكم رباط

مسامير الجهاز، ويضمن هذا الضبط أن يميل المستوى المار بمركز الكرة وخط تماثل بطاقة الاعتدالين – وهى موضوعة بالمسجل – على الرأسى بزاوية تساوى خط عرض المكان، هذا إذا كانت القاعدة مستوية أفقيًا.

الضبط بالنسبة لخط الطول:

يجرى هذا الضبط عن طريق التأكد من أن صورة الشمس تعبر خط ساعة ما من خطوط بطاقة سطوع الشمس عند التوقيت المحلى الظاهرى بالضبط، والأفضل أن يتم ذلك لدى توقيت الظهيرة المحلى، إذ أن الخلل فى ضبط الاستواء الأفقى تقل أهميته عندئذ، ضع الجهاز بحيث يوازى محور الكرة محور الأرض، ويتعين أن يشير قطب الكرة المرتفع نحو الشمال تمامًا بالاستعانة بمزواة(*) **theodolite**، وأفضل الطرق هو أن تضع دعامة الكرة – بالقدر المستطاع من الدقة – على استقامة الاتجاه الشمالى – الجنوبى بالاستعانة ببوصلة (مع حسبان ما هو مسموح به من انحراف) أو بالاتجاه الزاوى من خريطة جغرافية، ثم احشر بطاقة فى المسجل واحصل على أثر احتراق – على سبيل التجربة.

فإذا وجدت أن علامة الأثر الاحتراقى الحادث تتحرك بطول البطاقة فى اتجاه مواز للخط، فالجهاز مضبوط، وإذا لم يكن الأمر كذلك فينبغى تحريك المسجل تحريكًا يسيرًا عبر السمت حتى تحصل على الأثر الاحتراقى المضبوط، وعندما يكون موضع هذه العلامة التجريبية مرتفعًا على البطاقة لدى الصباح ومنخفضًا عليها بعد الظهر والمساء، فينبغى زحزحة القاعدة فى اتجاه عقارب الساعة (عند النظر إلى الجهاز من أعلى)، وفى حالة خطأ فى الاتجاه المعاكس يتم التحريك فى عكس اتجاه عقارب الساعة، ومن شأن زحزحة يسيرة أن تجلب فرقًا ملموسًا فى ميل العلامة الاحتراقية عبر البطاقة.

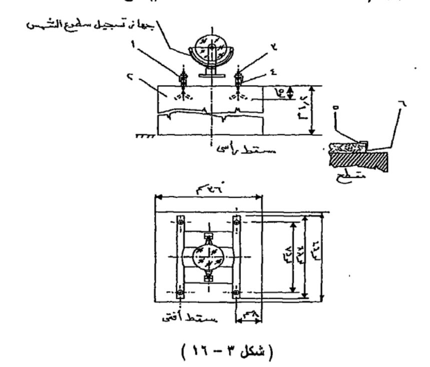
(*) المزواة **Theodolite**: جهاز ضوئى لقياس الزوايا فى الاتجاهين الأفقى والرأسى ويكثر استخدامه فى الأغراض المساحية والهندسية (المترجم)

وعندما تتحرك العلامة موازية تمامًا لخط تماثل البطاقة فيعنى هذا أن الضبط بالنسبة لخط طول جرينتش قد تحقق وليس من الضرورى إعادة ضبط المسجل إلا إذا حدث انفتال أو هبوط فى منسوب الدعامة بمرور الوقت.

الضبط الختامى:

بعد إجراء كل أعمال الضبط السابقة بدقة، يمكن تأمين تثبيت القاعدة فى العمود تثبيتًا مستديمًا بالخطوات التالية:

ضع شرائح مطاطية ذات سمك ٣ مم وعرض ٢ سم وطول ٢٠ سم على الحافتين الشرقية والغربية للقاعدة والقطعة الأنبوبية فوق المسامير الأربعة، ثم أدخل قطع الزوايا الحديدية فوقها كما هو مبين بشكل (٣ – ١٦) بحيث تتوافق الفتحات فى قطع الزوايا الحديدية (والمسافات بين هذه الفتحات ٢٨سم) مع مسامير الأساسات.



(شكل ٣ – ١٦)

الضبط الختامى لجهاز تسجيل سطوع الشمس

والآن أحكم ربط الصواميل فوق المسامير الأربعة، مع مراعاة أن يستقر الحشو المطاطى وينحشر بسمك منتظم بين القاعدة الرخامية والزاوية الحديدية المتداخلة معها، اختبر مرة ثانية الاستواء الأفقى للمسجل، وإذا لم يكن مستويًا أعد ضبط الاستواء بإدخال أسافين خشبية أو شرائح من القصدير بين قاعدة المسجل وقمة العمود بعد حل رباط الصواميل وتأكد مرة ثانية بعد إحكام ربط الصواميل، وبذلك يكون الجهاز قد أعد للاستعمال.

أخطاء عملية الضبط:

مع صحة جميع عمليات الضبط تحقق مما يلى:

أ) ينبغى أن تكون جميع التسجيلات في شريط ضيق وواضحة عند الحواف.

ب) يجب أن تكون العلامة الحادثة موازية لخطوط تماثل البطاقات.

جـ) يتعين أن يشير موضع صورة الشمس على البطاقات إلى التوقيت المحلى الظاهرى على مقياس الوقت المطبوع على البطاقات،ويمكن التأكد من هذا بحساب التوقيت القياسى للهند المناظر لوقت الظهيرة الظاهرى المحلى ليوم بعينه طبقا للتعليمات المعطاة فى الملحق (١)، وإيجاد ما إذا كانت صورة الشمس (ووفقًا لتوقيت ساعة اليد) تقع على خط الظهيرة الخاص ببطاقة اليوم (طالما أنها فى وضع مضبوط).

وقد يسبب أى عيب فى الضبط فقدانًا خطيرًا فى البيانات المسجلة فى أوقات معينة من العام، إذ قد ينحرف موقع العلامة بحيث تقع خارج حافة البطاقة، والعلامة المتماثلة التى لا توازى الخط المركزى تشير إلى خطأ فى الضبط بالنسبة لخط العرض، أما العلامة غير المتماثلة فسببها خلل فى الضبط بالنسبة لخط

الطول، وعدم الاستواء الأفقى، والعلامة التى يكــون موضــعها صــحيحًا عنــد الاعتدالين، ولكنها لا توازى خط المنتصف في فصول السنة الأخرى تــشير إلـــى زحزحة فى مركز الكرة بالمستوى المار بخط الاستواء السماوى، وسوء الــضبط فيما يخص مركزى الكرة والوعاء يتسبب فى علامـــة عريــضة وغيــر محــددة بوضوح لدى الحواف.

التشغيل:

إذا ركب الجهاز وضبط بطريقة صحيحة، فإنه لا يحتاج – فيما عدا تغييــر البطاقات اليومى – إلى كبير عناية ، وفى الظروف الطبيعية ينبغى تغيير البطاقات عقب غروب الشمس كل يوم، ومما ينصح به فى الــشهور المطيــرة أن توضـــع البطاقة الجديدة فى الصباح الباكر قبل شروق الشمس، وإذا تعذر من الناحية العملية لسبب ما تبديل البطاقات بعد مغيب الشمس، فيمكن اختيار أى ساعة أخرى، بشرط الالتزام الدقيق بهذا التوقيت فيما بعد.

وهناك خطر يتمثل فى تداخل علامات الاحتراق فوق البطاقة إذا ما تغيرت توقيتات التبديل، فإذا كانت الشمس ساطعة لدى تثبيت البطاقة، فينبغى حجب الكرة حتى لا تحدث علامات احتراق مضللة، وإذا لم تبــدل البطاقـــات عقــب غــروب الشمس، فلابد من تسجيل الوقت المضبوط لتثبيتها ونزعها على البطاقـــة، وعنـــد تثبيت البطاقات، لابد من مراعاة التأكد من أن خط الظهيرة على البطاقـــة منطبـــق بالضبط مع علامة الظهيرة على الوعاء، وإذا تعذر – بعد هطول مطـــر – نـــزع البطاقة دون تمزقها، فيجب قطعها، بالدوران بسكين حادة على امتداد حافـــة أحـــد البروزات التى تحفظها فى مكانها بكل عناية، ولابد من وضع بطاقة جديـــدة كـــل يوم، حتى وإن لم يسجل أى سطوع للشمس، ويجب تدوين التواريخ الصحيحة على ظهر كل البطاقات.

استعمال البطاقات:

تستعمل ثلاث فئات من البطاقات، فالبطاقات الطويلة المقوسة متوافقة مع مجموعة الحواف السفلية البارزة، فى حين تثبت البطاقات القصيرة المقوسة فى مجموعة الحواف العلوية البارزة المتوافقة معها، وتثبت البطاقات المستوية المخصصة للاعتدالين فى البروزات الوسطى، وهناك خطوط بيضاء (تشير للساعة) مطبوعة على البطاقات ومتعامدة مع الحواف الطويلة وموزعة توزيعًا متماثلاً حول علامة الظهيرة، وتشير التقاطعات للنقاط الواقعة على خط تماثل البطاقات، ويتراوح مقياس البطاقات بين ١٧,٥ ملليمتر / ساعة لدى الانقلابين، ١٩,١ ملليمتر / ساعة عند الاعتدالين.

وينبغى استعمال البطاقات الطويلة المقوسة المخصصة للصيف فى الفترة ما بين ١٢ إبريل إلى ٢ سبتمبر، شاملة هذين اليومين. وتثبت بحيث تكون حافتها المحدبة إلى أعلى ما أمكن فى حين تستعمل البطاقات القصيرة المقوسة المخصصة للشتاء ما بين ١٥ أكتوبر، ٢٨ فبراير (أو ٢٩ فبراير فى السنوات الكبيسة)، بما فى ذلك هذان اليومان.

وتخصص البطاقات المستوية لبقية أيام العام.

تقدير قيمة متوسط الإشعاع الشمسى:

البيانات عن الإشعاع هى أفضل مصدر معلومات لتقدير متوسط الإشعاع الساقط، ومتى تعذر الحصول على بيانات من مواقع قريبة ذات مناخ مشابه، فمن الممكن استعمال العلاقات التجريبية فى تقدير الإشعاع خلال ساعات السطوع الشمسى.

كانت معادلة الانحدار الأصلية من نوع أنجستروم تربط ما بين متوسط الإشعاع اليومى – خلال مدة شهر –، والإشعاع خلال يوم صاف مشمس فى نفس الموقع محل الدراسة، ومتوسط نسبة ساعات سطوع الشمس:

$$\frac{\overline{هـ}}{\overline{هـ}_{ص}} = \overline{أ} + \overline{ب}\ \frac{\overline{ن}}{\overline{ن}_{١}} \qquad (٣-٣)$$

حيث $\overline{هـ}$ = متوسط الإشعاع اليومى – على مدى شهر – على سطح أفقى.

$\overline{هـ}_{ص}$ = متوسط الإشعاع اليومى فى يوم صافى السماء فى نفس الموقع وخلال نفس الشهر.

$\overline{أ}$، $\overline{ب}$: ثابتان تجريبيان.

$\overline{ن}$ = متوسط ساعات سطوع الشمس خلال اليوم على مدى شهر.

$\overline{ن}_{١}$ = المتوسط الشهرى لأقصى عدد ساعات ممكن من السطوع الشمسى (أى متوسط طول ساعات النهار فى يوم متوسط من أيام الشهر).

وتقع الصعوبة الأساسية فى تطبيق المعادلة (٣-٣) فى غموض المقدارين $\frac{\overline{ن}}{\overline{ن}_{١}}$ ، $هـ_{ص}$ وقد عدل (باج) وآخرون الطريقة عام ١٩٦٤ بحيث تستند إلى الإشعاع خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى، أكثر من استنادها إلى الإشعاع فى يوم صاف:

$$\frac{\overline{هـ}}{\overline{هـ}} = أ + ب\ \frac{\overline{ن}}{\overline{ن}_{١}}$$

حيث $\overline{هـ}$ هو متوسط الإشعاع خارج جو الأرض لنفس الموضع خلال الفترة الزمنية محل البحث، أ، ب هما ثابتان معدلان، وفقًا لظروف الموضع، ويطلق على النسبة $\frac{\overline{هـ}}{\overline{هـ}}$ مؤشر درجة الصفاء **clearness index** ($\overline{ص}$)، وقد استخلصت علاقات تجريبية تربط بين متوسط الإشعاع اليومى فى بحر شهر ($\overline{هـ}$)، والمتوسط الشهرى للغطاء السحابى $\overline{س}$. وتأخذ العلاقة الصيغة:

$$\frac{\overline{هـ}}{\overline{هـ}_{.}} = أ' + ب' \, \overline{س}$$

وقد قارن بينيت (١٩٦٥) علاقة $\frac{\overline{هـ}}{\overline{هـ}_{.}}$ مع $\overline{س}$، بالنسبة $\frac{\overline{ن}}{\overline{ن}_{١}}$ ومتغير ناجم من دمج المتغيرين، وتوصل إلى أن أفضل علاقة هى تلك مع $\frac{\overline{ن}}{\overline{ن}_{١}}$.

بيانات الإشعاع الشمسى:

للمعلومات التالية عن الإشعاع أهميتها لاستيعابها واستعمالها:

١) القياسات اللحظية (الإشعاعية **irradiance**) أو القيم التى نحصل عليها بإجراء تكامل عبر فترة زمنية (**irradiation**) هى عادة ساعة أو يوم.

٢) الوقت أو الفترة الزمنية للقياسات.

٣) قياسات الإشعاع الحزمى والإشعاع الانتشارى والإشعاع الشامل وأدوات القياس.

٤) الفترة الزمنية التى يؤخذ المتوسط خلالها (مثلا المتوسطات الشهرية للإشعاع اليومى).

٥) توجه السطح المتلقى للإشعاع (ما إذا كان أفقيًا أو مائلاً ميلا ثابتًا أو عموديًا على الإشعاع الحزمى).

ومعظم بيانات الإشعاع المتاحة تخص السطح الأفقى، وتشمل كلا الإشعاعين المباشر والانتشارى، وقد تم القياس ببيرانومترات ثرموبيلية، وأغلب هذه الأدوات تعطى تسجيلات الإشعاع كدالة فى الزمن، ولا تعطى بذاتها وسيلة لإجراء التكامل الرياضى على هذه التسجيلات.

تقييم مقدار الإشعاع مع سماء صافية:

بالنظر إلى تقلبات الظروف الجوية ووجود الغلاف الهوائى، تتغير مع الوقت بالمثل تأثيرات الجو فى بعثرة الإشعاع وامتصاصه، ومما يفيد وضع تعريف قياسى لمفهوم "السماء الصافية" وحساب الإشعاع خلال ساعة والإشعاع اليومى الذى من شأنه أن يسقط على سطح أفقى فى ظل هذه الظروف القياسية.

وقد ابتكر هوتيل (١٩٧٦) وسيلة ميسرة لتقدير الإشعاع الحزمى الذى ينتقل خلال الجو الصافى، تأخذ فى الحسبان زاوية السمت ومقدار الارتفاع عن الأرض لأربعة أنواع من المناخ ولظروف قياسية ومقدار نسبة توصيل الجو للإشعاع الحزمى بـ (النسبة $\tau_{ب}$) تعطى بالمعادلة:

$$\tau_{ب} = أ_{.} + أ_{١}\, هـ^{-ك / جتا\, \theta_{ز}} \qquad (٣-٤)$$

والثوابت $أ_{.}$، $أ_{١}$، ك لظروف الجو القياسية فى مدى رؤية ٢٣ كم يمكن الحصول عليها بدلالة $أ_{.}^{*}$، $أ_{١}^{*}$، $ك^{*}$ والتى تحدد كدالة فى الارتفاع عن سطح الأرض (أقل من ٢,٥كم) بالمعادلات:

$$أ_{.}^{*} = ٠,٤٢٣٧ - ٠,٠٠٨٢١\,(٦ - ع)^{٢} \qquad (٣-٥)$$

$$أ_{١}^{*} = ٠,٥٠٥٥ - ٠,٠٠٥٩٥\,(٦,٥ - ع)^{٢} \qquad (٣-٦)$$

$$ك^{*} = ٠,٢٧١١ - ٠,٠١٨٥٨\,(٢,٥ - ع)^{٢} \qquad (٣-٧)$$

حيث ع هو ارتفاع الراصد بالكيلو متر، وتدخل معاملات تصحيح على المقادير $أ_{.}^{*}$، $أ_{١}^{*}$، $ك^{*}$ طبقا لنوعية المناخ، ويبين جدول (٣ – ١) مقادير معاملات التصحيح

$$ر_{.} = \frac{أ_{.}}{أ_{.}^{*}}،\quad ر_{١} = \frac{أ_{١}}{أ_{١}^{*}}،\quad ر_{ك} = \frac{ك}{ك^{*}}$$

جدول (٣-١) معاملات التصحيح لفئات المناخ المختلفة

فئة المناخ	ر.	ر١	رك
مناخ استوائى	٠,٩٥	٠,٩٨	١,٠٢
خط عرض متوسط – صيفا	٠,٩٧	٠,٩٩	١,٠٢
مناخ شبه قطبى – صيفا	٠,٩٩	٠,٩٩	١,٠١
خط عرض متوسط – شتاءً	١,٠٣	١,٠١	١,٠٠

وهكذا فإن قدرة هذا الجو القياسى على نقل الإشعاع الحزمى يمكن التوصل لها لأية زاوية سمت وأى ارتفاع وحتى ٢,٥كم، ويكون الإشعاع الحزمى الطبيعى للسماء الصافية.

ش ص ط ح = ش. ط – ح $^{\tau}$ (٣-٨)

حيث يمكن إيجاد ش. ط من المعادلة:

ش. ط [١ + ٠,٠٣٣ جتا $\frac{٣٦٠ ن}{٣٦٥}$] (٣-٩)

والمقدار (ش. ط) هو الإشعاع خارج الغلاف الجوى مقيسا على سطح عمودى عليه لدى اليوم الذى ترتيبه من العام ن، والإشعاع الحزمى الأفقى لسماء صافية.

ش ص ح = ش. ط – ح $^{\tau}$ جتا θ س (٣-١٠)

ويكون الإشعاع الأفقى لسماء صافية لمدة ساعة I ص ح = I. ط – ح $^{\tau}$ جتا θ س

(٣-١١)

ويلزم كذلك تقدير الإشعاع الانتشارى لسماء صافية على سطح أفقى للحصول على الإشعاع الشامل.

وقد طور (ليو)، (جوردان) فى ١٩٦٠ علاقة تجريبية بين معامل انتقال الإشعاع الحزمى والانتشارى فى الأيام الصافية:

$$ح_ر = ٠,٢٧١٠ - ٠,٢٩٣٩ \, ح\tau \qquad (٣-١٢)$$

حيث $ح_ر = \frac{ش_ر}{ش.}$ (أو $\frac{I_ر}{I.}$) هى النسبة بين الإشعاع الانتشارى والإشعاع خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى.

ويمكن تطبيق المعادلة (٣ – ١٢) لتقدير الإشعاع الانتشارى مع سماء صافية والذى إذا أضيف إلى الإشعاع الحزمى المتنبأ به بطريقة (هوتيل)، نحصل على الإشعاع الكلى فى يوم ذى سماء صافية.

مثال (٣): احسب نسبة الانتقال لإشعاع حزمى فى ظروف صفاء جوى قياسية عند خط عرض ٤٣° شمالا وارتفاع ٢٧٠ مترًا يوم ٢٢ أغسطس فى الساعة ١١، ٣٠ دقيقة قبل الظهر بالتوقيت الشمسى، احسب شدة الإشعاع الحزمى فى ذلك الوقت ومركبته على سطح أفقى واحسب بالمثل الإشعاع القياسى ليوم صاف على سطح أفقى.

الحل: فى يوم ٢٢ أغسطس، ن (ترتيب اليوم) = ٢٣٤، الميل **declination**، = ١١,٤ وجيب تمام زاوية السمت = ٠,٨٤٦، وتكون قيم المعاملات لدى ارتفاع ٠,٢٧كم كالآتى:

$$أ.^* = ٠,٤٢٣٧ - ٠,٠٠٨٢١ \, (٦ - ٠,٢٧)^٢ = ٠,١٥٤$$

$$أ_١^* = ٠,٥٠٥٥ - ٠,٠٠٥٩٥ \, (٦,٥ - ٠,٢٧)^٢ = ٠,٧٣٦$$

$$ك^* = ٠,٢٧١١ + ٠,٠١٨٥٨ \, (٢,٥ - ٠,٢٧)^٢ = ٠,٣٦٣$$

ومعامل التعديل بالنسبة لفئة الجو عند خط عرض متوسط وفى فصل الصيف

τح = ٠,١٥٤ (٠,٩٧) + ٠,٧٣٦ (٠,٩٩) هـ ^–٠,٣٦٣ (٠,٠٢)/٠,٨٤٦^

= ٠,٦٢

والمعادلة التى تعطى الإشعاع خارج الغلاف الجوى هى:

ش.ن = ث ش (١ + ٠,٠٠٣ جتا $\frac{\text{٣٦٠ن}}{\text{٣٦٥}}$)

حيث ث ش = ١٣٥٣ وات /م٢، ش.ط = ١٣٢٥ وات /م٢

ش ص ط ح = ١٣٢٥ x ٠,٦٢ = ٨٢٢ وات /م٢

والمركبة العمودية على سطح أفقى = ٨٢٢ x ٠,٨٤٦ = ٦٩٥ وات /م٢

ويلزم بالمثل تقدير الإشعاع الانتشارى فى جو صاف علـى سـطح أفقـى لحساب الإشعاع الإجمالى، وقد طور ليو وجوردان (١٩٦٠) العلاقـة التجريبيـة التالية بين معامل الانتقال للإشعاع الحزمى والانتشارى فى الأيام الصافية

τش = ٠,٢٧١٠ – ٠,٢٩٣٩ τح

حيـث τش = $\frac{G_d}{G_o}$ (أو $\frac{I_d}{I_o}$) أى النسبة بـين الإشـعاع الانتـشارى والإشعاع خارج الغلاف الجوى على مستوى أفقى:

ومن الحسابات السالفة نجد أن الإشعاع الحزمى على سطح أفقى لمدة ساعة = ٦٩٥ x ٣٦٠٠ = ٢,٥٠ ميجا جول /م٢

أما τش = ٠,٢٧١٠ – ٠,٢٩٣٩ (٠,٦٢) = ٠,٠٨٩

والسطوع الانتشارى **diffuse irradiance** على مستوى أفقى نحصل عليـه من قيمة (ش.ت) يوم ٢٢ أغسطس (١٣٢٥ وات /م٢) وجيب تمام الزاويـة θ س عند الساعة ١١،٣٠ دقيقة = ٠,٨٤٦

ش ص ش = ١٣٢٥ x ٠,٠٨٩ x ٠,٨٤٦ = ١٠٠ وات /م٢

والإشعاع الانتشارى على مدى ساعة = ٠,٣٦ ميجاجول / م٢

مثال (٤): احسب الإشعاع العمودى خارج الغلاف الجوى، والإشعاع خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى يوم ١٥ فبراير الساعة الثانية بعد الظهر عند خط عرض ٤٠° شمالاً، احسب أيضًا الإشعاع الشمسى الإجمالى على سطح أفقى خارج الغلاف الجوى فى نفس اليوم.

الحل: تحسب زاوية الميل **declination** فى ١٥ فبراير (ترتيب اليوم ن = ٤٦).

δ = ٢٣,٤٥ جا [$\frac{٣٦٠}{٣٦٥}$(٢٨٤ + ٤٦)] = -١٣,٣°

وتحسب زاوية الساعة ω عند الثانية بعد الظهر.

ω = + $\frac{١}{٤}$ (عدد الدقائق اعتبارًا من وقت الظهيرة المحلــى) = $\frac{١}{٤}$ (١٢٠) =٣٠°

ولدى الغروب تكون ω غ = جتا $^{-١}$ (ظا ø طا δ) = جتا $^{-١}$ [-ظا ٤٠ ظا (-١٣,٣)] = ٧٨,٦°

ويحسب الإشعاع العمودى خارج الغلاف الجوى من العلاقة

ش.ن = ث ش [١ + ٠,٠٣٣ جتا ($\frac{٣٦٠ن}{٣٦٥}$)]

= ١٣٥٣ [١ + ٠,٠٣٣ جتا ($\frac{٣٦٠ x ٤٦}{٣٦٥}$)] = ١٣٨٤ وات /م٢

والإشعــاع خارج الغلاف الجــوى على سطح أفقى = ش. = ش.ن (جا ø جا δ + جتاø جتا δ جتا ω)

= ١٣٨٤ [جا ٤٠ جا (-١٣,٣) + جتا ٤٠ جتــا (-١٣,٣) جتــا ٣٠] = ٦٨٩ وات/م٢

والإشعاع الإجمالى على سطح أفقى خارج الغلاف الجوى = **Ho**

$= \frac{٢٤}{ط}$ ش.ن [جتا ø جتا δ جا $\omega_{غ}$ + ($\frac{٢ط \ \omega غ}{٣٦٠}$) جا ø جا δ]

$= \frac{٢٤}{ط}$[١٣٨٤ x ٣٦٠٠] [جتا ٤٠ جتا (–١٣,٣) جا ٧٨,٦ + ($\frac{٢ ط x ٧٨,٦}{٣٦٠}$)

جا ٤٠ جا (–١٣,٣) = ٢٠,١ x ١٠ ^٦ جول / م٢ = ٢٠,١ ميجاجول / م٢

مثال (٥): ما مقدار الإشعاع الشمسى على سطح أفقـى بـافتراض غيـاب الغلاف الجوى) عند خط عرض ٤٠° شمالا يوم ١٥ إبريل بين الساعة ١٠، ١١ ؟

الحل: زاوية الميل = ٩,٤°، ω_1 = –٣٠°، ω_2 = – ١٥°

$I_0 = \frac{١٢ x ٣٦٠٠}{ط}$ (١٣٥٣) [١ + ٠,٠٣٣ جتا $\frac{٣٦٠ x ١٠٥}{٣٦٥}$] [$\frac{٢ط (-١٥-(-٣٠)}{٣٦٠}$)

جا ٤٣ جا ٩,٤ + جتا٤٣ جتا ٩,٤ (جا (–١٥) –جا (–٣٠)] = ٣,٧٥ ميجا جول / م٢

مقياس الصفاء Clearness Index:

المتوسط الشهرى لمقياس الصفاء $\overline{ص}$ هو النسبة بـين متوسـط الإشـعاع الشهرى على سطح أفقى ومتوسط الإشعاع اليومى خارج الغلاف الجوى على مدى شهر، وفى صورة معادلة:

$$\overline{ص} = \frac{\overline{هـ}}{\overline{هـ.}}$$

وبالإمكان بالمثل تعريف مقياس الصفاء اليومى (ص) كنسبة ما بين إشـعاع يوم معين إلى الإشعاع خارج الغلاف الجوى لنفس اليوم: ص $= \frac{هـ}{هـ.}$

كما يعرف مقياس الصفاء لساعة ما بالنسبة $ص_{س} = \frac{I}{I.} = \frac{س}{س.}$

وتأتى بيانات $\overline{هـ}$، هــ، I من القياسات لمجمل الإشعاع الشمسى على سطح أفقى بالاستعانة بجهاز بيرانومتر.

مركبتا الإشعاع الحزمى والانتشارى فى الإشعاع لمدة ساعة:

تفيد معرفة مركبتى الإشعاع الحزمى والانتشارى لإشعاع لمدة ساعة فى ناحيتين، فأولا، تحتاج طرق حسابات إجمالى الإشعاع على الأسطح ذات التوجهات الأخرى والمستقاة من البيانات الخاصة بسطح أفقى، تحتاج معالجة مستقلة لكل من الإشعاع الحزمى والانتشارى، ومن جهة أخرى ينبغى أن تؤسس تقييمات الأداء على المدى الطويل لأغلب المجمعات بالتركيز، على تقدير مدى إتاحة الإشعاع الحزمى.

وقد استخدم (أورجيل) و(هولاند) فى ١٩٧٧ العلاقات التالية لتقدير النسبة $\frac{ى_ش}{ى}$ (الكسر من إشعاع الساعة الواحدة على سطح أفقى الذى ينتشر لدى مقياس صفاء للساعة $ص_س$:

$$\frac{ى_ش}{ى} = \begin{cases} \text{١,٠ − ٠,٢٤٩ ص} & \text{إذا كانت ص ‹ ٠,٣٥} \\ \text{١,٥٥٧ − ١,٨٤ ص} & \text{إذا كانت ٠,٣٥ ‹ ص ‹ ٠,٧٥} \\ \text{٠١,٧٧} & \text{إذا كانت ص › ٠,٧٥} \end{cases}$$

مركبتا الإشعاع الحزمى والانتشارى فى إشعاع يومى:

أشارت الدراسات المتاحة عن الإشعاع اليومى إلى أن متوسط النسبة التى تنتشر $\frac{هـ_ش}{هـ}$ دالة فى ص، وقد عبر (كولانيس بيريرا) و(رابل) عن هذه العلاقة بالمعادلات التالية:

$$\frac{هـ_ش}{هـ} \begin{cases} = ٠,٩٩ & \text{إذا كانت ص} \geq ٠,١٧ \\ = ١,١٨٨ - ٢,٢٧٢ص + ٩,٤٧٣ص^٢ - ٢١,٨٦٥ص^٣ + ١٤,٦٤٨ص^٤ & \text{إذا كانت ٠,١٧ › ص › ٠,٧٥} \\ = -٠,٥٤ص + ٠,٦٣٢ & \text{إذا كانت ٠,٧٥ › ص › ٠,٨٠} \\ = ٠,٢ & \text{إذا كانت ص} \leq ٠,٨ \end{cases}$$

أما العلاقة التى أعطاها (ليو) و (جوردان)" فتأخذ الصورة

$$\frac{هـ_ش}{هـ} = ١,٠٠٤٥ + ٠,٠٤٣٤٩ص - ٣,٥٢٢٧ص^٢ + ٢,٦٣ص^٣$$

وهناك علاقة أخرى صاغها (إربس) وآخرون:

$$\text{لقيم } \omega_غ › ٨١,٤^\circ \quad \frac{هـ_ش}{هـ} = \begin{cases} ١,٠ - ٢٧٢٧ص + ٢,٤٤٩٥ص^٢ \\ -١١,٩٥١٤ص^٣ + ٩,٣٨٧٩ص^٤ & \text{إذا كانت ص › ٠,٧١٥} \\ ٠,١٤٣ & \text{إذا كانت ص ‹ ٠,٧١٥} \end{cases}$$

$$\text{ولقيم } \omega_غ > ٨١,٤^\circ \quad \frac{هـ_ش}{هـ} \begin{cases} ١,٠ + ٠,٢٨٣٢ص - ٢,٥٥٥٧ص^٢ + ٠,٨٤٤٨ص^٣ & \text{إذا كانت ص › ٠,٧٢٢} \\ ٠,١٧٥ & \text{إذا كانت ص ‹ ٠,٧٢٢} \end{cases}$$

مركبتا الإشعاع الحزمى والانتشارى فى متوسط الإشعاع الشهرى:

بين (كولاريس بيريرا) و (رابل) أن الكسر الذى ينتشر فى متوسط الإشعاع الشهرى $\frac{\bar{هـ}_ش}{\bar{هـ}}$ هو دالة فى متوسط مقياس الصفاء الشهرى ص $= \frac{\bar{هـ}}{\bar{هـ}_.}$، والمعادلة للنسبة $\frac{\bar{هـ}_ش}{\bar{هـ}}$

حيث قيم $\omega_غ$ بالدرجات، أى أن زاوية الساعة عند الغروب:

$$\frac{\text{هـ ش}}{\text{هـ}} = ٠,٧٧٥ + ٠,٠٠٦٥٣ \left(\omega_{غ} - ٩٠\right) - \left[٠,٥٠٥ + ٠,٠٠٤٥٥ \left(\omega_{غ} - ٩٠\right)\right] \text{جتا} \left[١١٥ \overline{\text{ص}} - ١٠٣\right]$$

تقدير الإشعاع فى ساعة ما من بيانات يوم:

عرف كولاريس بيريرا ورابل (١٩٧٩) القيمة $ن_١$ وهى النسبة من إجمالى إشعاع ساعة ما إلى إجمالى إشعاع اليوم بالمعادلة:

$$ن_١ = \frac{ط}{٢٤} \left(أ + ب \ \text{جتا} \ \omega\right) \frac{\text{جتا} \ \omega - \text{جتا} \ \omega_{غ}}{\text{جا} \ \omega_{غ} - \left(\frac{٢ \ ط \ \omega_{غ}}{٣٦٠}\right) \text{جتا} \ \omega_{غ}}$$

ويعطى المعاملان أ، ب من العلاقتين:

$$أ = ٠,٤٠٩ + ٠,٥٠١٦ \ \text{جا} \left(\omega_{غ} - ٦٠\right)$$

$$ب = ٠,٦٦٠٩ - ٠,٤٧٦٧ \ \text{جا} \left(\omega_{غ} - ٦٠\right)$$

حيث ω فى هذه المعادلات هى زاوية الساعة بالدرجات فى التوقيت محل البحث (منتصف الساعة التى تجرى لها الحسابات مثلا)، $\omega_{غ}$ هى زاوية الساعة لدى الغروب.

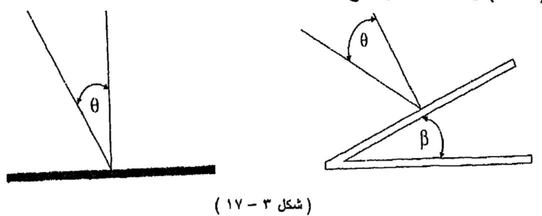
وقد عبر ليو وجوردان (١٩٦٠) عن $ن_{ش}$ (النسبة بين الإشعاع الانتشارى فى خلال ساعة إلى الإشعاع الانتشارى خلال يوم بالعلاقة:

$$ن_{ش} = \frac{ط}{٢٤} \left[\frac{\text{جتا} \ \omega - \text{جتا} \ \omega_{غ}}{\text{جا} \ \omega_{غ} - \frac{٢ \ ط \ \omega_{غ}}{٣٦٠} \text{جتا} \ \omega_{غ}}\right]$$

النسبة بين الإشعاع الحزمى على سطح مائل وذلك على سطح أفقى:

يلزم – بصفة عامة – حساب الإشعاع لمدة ساعة على سطح مائل لمجمع من القياسات أو الحسابات لإشعاع الشمس على سطح أفقى لعمل التصميمات وحسابات الأداء، والبيانات الأكثر شيوعًا وتداولا هى إجمالى الإشعاع لساعات أو لأيام على سطح أفقى فى حين نحتاج لمعلومات على الإشعاع على مستوى سطح المجمع سواء كإجمالى أو مقسمًا إلى حزمى وانتشارى.

والنسبة بين الإشعاع الحزمى على سطح مائل إلى ذلك الإشعاع على سطح أفقى فى أى وقت والمعبر عنها بالرمز ن ز يمكن حسابها بالضبط، ويبين شكل (٣–١٧) زاوية سقوط الإشعاع الحزمى على سطحين أفقى ومائل.



(شكل ٣ – ١٧)

الإشعاع الحزمى على سطحين أفقى ومائل

وتعطى النسبة $\frac{G_{bt}}{G_b}$ ($\frac{\text{الإشعاع الحزمى على سطح مائل}}{\text{الإشعاع الحزمى الكلى}}$) بالمعادلة

$$\text{ن ز} = \frac{G_{bt}}{G_b} = \frac{G_{bn}\ \text{جتا}\ \theta}{G_{bn}\ \text{جتا}\ \theta_{\text{س}}} = \frac{\text{جتا}\ \theta}{\text{جتا}\ \theta_{\text{س}}}$$

ويمكن تحديد جتا θ س بالعلاقة التى سبق ورودهـا بالكتـاب(*)، وزاويـة السمت المثلى للمجمعات ذات الصفائح المسطحة تساوى – عـادة – صـفرا فـى نصف الكرة الشمالى (أو ١٨٠° فى نصف الكرة الجنوبى) وينتج من ذلك أن:

$$ن_ز = \frac{جتا (\phi - \beta)\ جتا\ \delta\ جتا\ \omega + جا (\phi - \beta)\ جا\ \delta}{جتا\ \phi\ جتا\ \delta\ جتا\ \omega + جا\ \phi\ جا\ \delta}$$

وفى نصف الكرة الجنوبى γ = ١٨٠° وتعطى ن ز من العلاقة

$$ن_ز = \frac{جتا (\phi + \beta)\ جتا\ \delta\ جتا\ \omega + جا (\phi + \beta)\ جا\ \delta}{جتا\ \phi\ جتا\ \delta\ جتا\ \omega + جا\ \phi\ جا\ \delta}$$

إجمالى الإشعاع على الأسطح المنحدرة المثبتة:

تمتص المجمعات ذات الـصفائح المـسطحة كـلا الإشـعاعين الحزمـى والانتشارى الشمسيين، ولابد من معرفة ن (النسبة بين الإشعاع على سطح مائـل، وذلك الإشعاع على سطح أفقى) لكى نستعمل بيانات الإشعاع الإجمالى على سطح أفقى فى تحديد الإشعاع على سطح مائل:

$$ن = \frac{ى_م}{ى} = \frac{\text{الإشعاع الكلى على سطح مائل}}{\text{الإشعاع الكلى على سطح أفقى}}$$

ويمكن التعبير عن (ن) بدلالة الإشعاع الحزمى والانتشارى:

$$ن_ز = \frac{ى_{ز\,م}}{ى_ز} = \frac{\text{الإشعاع الحزمى على سطح مائل}}{\text{الإشعاع الحزمى على سطح أفقى}}$$

$$ن_ش = \frac{ى_{ش\,م}}{ى_ش} = \frac{\text{الإشعاع الانتشارى على سطح مائل}}{\text{الإشعاع الانتشارى على سطح أفقى}}$$

$$ن = \frac{ى_ز}{ى} ن_ز + \frac{ى_ش}{ى} ن_ش$$

(*) هى العلاقة الواردة حين بحث الزوايا والعلاقات بينها بشكل (٣–٥) (المترجم)

وقد اقترح هوتيل وفورتس (١٩٤٢) فكرة أن المركبة الانتشارية متجانسة التوزيع عبر السماء، وفى ظل هذا الافتراض تكون ن ش دوما مساوية للوحدة وتعطى طاقة الإشعاع **irradiation** على سطح مائل فى خلال ساعة بالمعادلة:

$$ى_{م} = ى_{ز}\, ن_{ز} + ى_{ش}$$

والنسبة الفعالة ن بين الطاقة الشمسية على سطح مائل وتلك على سطح أفقى تكون

$$ن = \frac{ى_{م}}{ى} = \frac{ى_{ز}}{ى}\, ن_{ز} + \frac{ى_{ش}}{ى}$$

ولقد أدخل ليو وجوردان (١٩٦٣) تطويرًا على هذا النموذج، بأن اعتبرا الإشعاع على سطح مائل مكونًا من ثلاث مركبات: الإشعاع الحزمى والإشعاع الشمسى الانتشارى والإشعاع الشمسى المنعكس – بصورة انتشارية – من سطح الأرض، فالسطح المائل بزاوية (β) على الأفقى له معامل توجه أو رؤية **view factor** مع السماء مقداره (١ + جتا β) ÷ ٢، وإذا كان الإشعاع الشمسى الانتشارى متجانسًا فى كل الاتجاهات فكذلك هى النسبة ن ش.

وللسطح معامل مواجهة مع الأرض مقداره ($\frac{١-جتا β}{٢}$)، وإذا كان للوسط المحيط معامل انعكاسية قدره أ (للإشعاع الشمسى الكلى)، فإن الإشعاع المنعكس من الوسط المحيط على السطح لمدة ساعة هو مجموع الثلاث مركبات:

$$ى_{ج} = ى_{ز}\, ن_{ز} + ى_{ش} \left(\frac{١+جتا β}{٢}\right) + (ى_{ز} + ى_{ش}) .أ. \left(\frac{١-جتا β}{٢}\right)$$

وبحكم تعريف (ن): $ن = \frac{ى_{ز}}{ى}\, ن_{ز} + \frac{ى_{ش}}{ى} \left(\frac{١+جتا β}{٢}\right) + أ \left(\frac{١-جتا β}{٢}\right)$

ويقترح ليو وجوردان قيمة لمعامل انعكاسية الأرض الانتشارية قدره (٠,٢) فى حالة غياب الجليد، ٠,٧ فى حالة وجود غطاء جليدى جديد، والحدان الأخيران فى المعادلة يعتبران معا أحيانًا بمثابة الإشعاع الانتشارى الساقط على السطح.

متوسط الإشعاع على الأسطح المنحدرة والمثبتة:

لدى خطوات العمل لتصميم منظومات التسخين بالطاقة الشمسية نحتاج كذلك لمعرفة ن: النسبة بين المتوسط اليومى للإشعاع على سطح مائل على مدى شـــهر، وذلك الإشعاع على سطح أفقى، وخطوات حساب ن شبيهة بخطوات حـــســـاب $\bar{\text{ن}}$، أى تتم بإضافة مركبات الإشعاع الحزمى والإشعاع الانتشارى والإشعاع الشمـــسى المنعكس من سطح الأرض، وبافتراض تجانس كـــل مـــن الإشـــعاع الانتـــشارى والمنعكس فى جميع الاتجاهات، بوسعنا التعبير عن النسبة الشهرية المتوســـطة $\bar{\text{ن}}$ بالصيغة:

$$\bar{\text{ن}} = \frac{\bar{\text{هـ}}_{\text{م}}}{\bar{\text{هـ}}} = \left(\text{١} - \frac{\bar{\text{هـ}}_{\text{ش}}}{\bar{\text{هـ}}}\right)\bar{\text{ن}}_{\text{ز}} + \frac{\bar{\text{هـ}}_{\text{ش}}}{\bar{\text{هـ}}}\left(\frac{\text{١+جتا}\beta}{\text{٢}}\right) + \text{أ}\left(\frac{\text{١-جتا}\beta}{\text{٢}}\right)$$

أى أن: $\bar{\text{هـ}}_{\text{م}} = \bar{\text{هـ}}\left(\text{١} - \frac{\bar{\text{هـ}}_{\text{ش}}}{\bar{\text{هـ}}}\right)\bar{\text{ن}}_{\text{ز}} + \bar{\text{هـ}}_{\text{ش}}\left(\frac{\text{١+جتا}\beta}{\text{٢}}\right) + \bar{\text{هـ}}.\text{أ}\left(\frac{\text{١-جتا}\beta}{\text{٢}}\right)$

والنسبة $\frac{\bar{\text{هـ}}_{\text{ش}}}{\bar{\text{هـ}}}$ هى نسبة متوسط الإشعاع الانتشارى اليومى على مدى شـــهر إلى متوسط الإشعاعى الإجمالى اليومى على مدى شهر على سطح أفقى، وهى دالة فى $\text{ص}_{\text{م}}$، $\bar{\text{ن}}_{\text{ز}}$ هى نسبة متوسط الإشعاع الحزمى اليومى على سطح مائل إلى ذلك الإشعاع على سطح أفقى لمدة شهر، = $\bar{\text{هـ}}_{\text{زم}} / \bar{\text{هـ}}_{\text{ز}}$.

وللأسطح المنحدرة صوب خط الاستواء فى نـــصف الكـــرة الـــشمالى، أى للسطوح ذات قيمة $\gamma = \text{.}^{\circ}$:

$$\bar{\text{ن}}_{\text{ز}} = \frac{\text{جتا}(\varnothing - \beta)\,\text{جتا}\,\delta\,\text{جا}\,\omega'_{\text{غ}} + \frac{\text{ط}}{\text{١٨٠}}\omega'_{\text{غ}}\,\text{جا}(\varnothing - \beta)\,\text{جا}\,\delta}{\text{جتا}\,\varnothing\,\text{جتا}\,\delta\,\text{جا}\,\omega_{\text{غ}} + \frac{\text{ط}}{\text{١٨٠}}\omega_{\text{غ}}\,\text{جا}\,\varnothing\,\text{جا}\,\delta}$$

حيث $\bar{\omega}_{غ}$ هى زاوية الساعة لدى الغروب للسطح المائل فى اليوم المتوسط من الشهر، وتعطى بالقيمة الأقل من القيمتين: جتا $^{-1}$ (- ظا ø ظا 6) أو جتا $^{-1}$ [- ظا (ø - β) ظا δ]، أيهما أقل.

وللأسطح الواقعة فى نصف الكرة الجنوبى والمنحدرة صوب خط الاستواء، حيث γ = ١٨٠ ْ:

$$\bar{ن}_{ز} = \frac{جتا\,(\text{Ø} + \beta)\ جتا\,\delta\ جا\,\bar{\omega}_{غ} + \frac{ط}{١٨٠}\,\bar{\omega}_{غ}\ جا\,(\text{Ø} + \beta)\ جا\,\delta}{جتا\,\text{Ø}\ جتا\,\delta\ جا\,\omega_{غ} + \frac{ط}{١٨٠}\,\omega_{غ}\ جا\,\text{Ø}\ جا\,\delta}$$

، $\bar{\omega}_{غ}$ = جتا $^{-1}$ (- ظا ø ظا δ) أو جتا $^{-1}$ [- ظا (ø + β) ظا δ]، أيهما أقل.

مثال (٦): احسب متوسط الإ.٠٠٠شعاع الشمسى الإجمالى اليومى على مدى شهر على سطح يواجه جهة الجنوب ومائل بزاوية ٣٥ ْ فى موقع على خط عرض ٣٥ ْ شمالا وذلك خلال: (أ) شهر يناير، (ب) شهر يونية بمعلومية القيم التالية للمتوسط اليومى على مدى الشهر للتعرض للشمس لسطح أفقى:

$\bar{هـ}$ = ٩٥٥٠ كيلو جول / م٢ فى اليوم خلال يناير.

$\bar{هـ}$ = ٢٦٨٠٠ كيلو جول / م٢ فى اليوم خلال يونيو.

$\bar{هـ}_{.}$ = ١٨٠٧٠ كيلو جول / م٢ فى اليوم خلال يناير.

$\bar{هـ}_{.}$ = ٤١١٣٠ كيلو جول / م٢ فى اليوم خلال يونيو.

الحل (أ): $ص_{م} = \frac{٩٥٥٠}{١٨٠٧٠} = ٠,٥٢٩$

$\frac{\bar{هـ}_{ش}}{\bar{هـ}}$ = ١,٣٩٠ - ٤,٠٢٧ $\bar{ص}_{م}$ + ٥,٥٣١ $\bar{ص}^{٢}_{م}$ - ٣,١٠٨ $\bar{ص}^{٣}_{م}$

= ١,٣٩٠-٤,٠٢٧ (٠,٥٢٩) + ٥,٥٣١ (٠,٥٢٩)^{٢} - ٣,١٠٨ (٠,٥٢٩)^{٣}

= ٠,٣٥

واليوم المتوسط المحبذ لشهر يناير هو يوم ١٧ يناير (أى أن ترتيب اليوم = ١٧)

δ = ٢٣,٤٥ جا [(٣٦٠ / ٣٦٥) (٢٨٤ + ١٧)] = – ٢٠,٩°

وزاوية الساعة للغروب على سطح مائل هى:

ωغ = جتا$^{-1}$ (– ظا ø ظا δ) أو جتا$^{-1}$ [– ظا ٣٥ طا (-٢٠,٩)] = ٧٤,٥°

وتعطى زاوية الساعة لدى الغروب على سطح مائل $\bar{\omega}$غ بأقل المقدارين ωغ أو جتا$^{-1}$ [– ظا (ø – β) ظا δ]:

جتا$^{-1}$ [– ظا (ø – β) ظا δ] = جتا$^{-1}$ [– ظا (٣٥ – ٣٥) طا (-٢٠,٩)]

= ٩٠°

وعليه فإن $\bar{\omega}$غ = ٧٤,٥°

ن̄ ز = [جتا (ø – β) جتا $\bar{\delta}$ جا $\bar{\omega}$غ + (ط / ١٨٠) $\bar{\omega}$غ جا (ø - β) جا $\bar{\delta}$] / [جتا ø جتا $\bar{\delta}$ جا ωغ + (ط / ١٨٠) ωغ جا ø جا $\bar{\delta}$]

= [جتا (٣٥ – ٣٥) جتا (- ٢٠,٩) جا ٧٤,٥ + (ط / ١٨٠) جا (٣٥ – ٣٥) جا (-٢٠,٩)] / [جتا ٣٥ جتا (-٢٠,٩) جا ٧٤,٥ + (٧٤,٥×ط / ١٨٠) جا ٣٥ جا (-٢٠,٩)]

وبافتراض معامل انعكاسية للأرض ع ض قدره ٠,٢ يحسب المعامل ن̄

ن̄ = (١ – هـ̄ش / هـ̄) ن̄ ز + (هـ̄ش / هـ̄) ((١+جتاβ) / ٢) + ع ض ((١- جتاβ) / ٢)

= (١ – ٠,٣٥) (١,٩١) + ٠,٣٥ ((١+جتا ٣٥) / ٢) + ٠,٢ ((١- جتا ٣٥) / ٢) = ١,٥٨

ولنحسب الآن متوسط الإشعاع اليومى الكلى على سطح مائل لشهر يناير:

هـ̄ م = ن̄ هـ̄ = ١,٥٨ x ٩٥٥٠ = ١٥١٠٠ كيلو جول / م٢ فى اليوم

(ب) باتباع ذات الخطوات كما فى الفقرة (أ): ص̄ م = ٠,٦٥٢

وباستخدام صيغة كولاريس بيريرا ورابل: $\frac{\bar{هـ}_{ش}}{\bar{هـ}} = ٠,٣٧$

δ = ٢٣,١ (وباعتبار اليوم المحبذ ١١ يونيو فإن ترتيبه ن = ١٦٢)

$\omega_{غ}$ = ١٠٧°

$\omega_{غ}$ = جتا $^{-1}$ [– ظا $(\varnothing - \beta)$ ظا δ] = ٩٠°، $\omega'_{غ}$ = ٩٠°

$\bar{ن}_{ز}$ = ٠,٨٠٦

$\bar{ن}$ = ٠,٨٦٢

$\bar{هـ}_{م}$ = ٢٣١٠٠ كيلو جول / م٢ فى اليوم

مثال (٧): احسب متوسط الإشعاع الإجمالى ومتوسط الإشعاع الانتشارى للساعة ما بين ١٠,٠٠، ١١,٠٠ صباحًا، والساعة ما بين ١,٠٠، ٢,٠٠ بعد الظهر (بالتوقيت الشمسى) فى شهر يونيو على سطح أفقى يقع على خط عرض ٤٠° شمالاً، علما بأن المتوسط اليومى للإشعاع الكلى على مدى شهر على سطح أفقى هـ عند موقع هذا السطح لشهر يونيو = ٢٢١٥٠ كيلو جول / م٢ فى اليوم، وبمعلومية المعادلة التجريبية التالية:

$$\frac{\bar{هـ}_{ش}}{\bar{هـ}} = ١,٣٩٠ - ٤,٠٢٧\,\bar{ص}_{م} + ٥,٥٣١\,\bar{ص}^{٢}_{م} - ٣,١٠٨\,\bar{ص}^{٣}_{م}$$

$\bar{هـ}_{.}$ = ٤١٣٣٠ كيلو جول / م٢ فى اليوم.

حيث $\bar{هـ}_{ش}$ = المتوسط اليومى للإشعاع الانتشارى على مدى شهر على سطح أفقى.

$$\bar{ص}_{م} = \frac{\bar{هـ}}{\bar{هـ}_{.}}$$

$\bar{هـ}_{.}$ = المتوسط اليومى للإشعاع الإجمالى على مدى شهر خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى

الحل: $\overline{ص}_م = \frac{\overline{هـ}}{\overline{هـ}_.} = \frac{٢٢١٥٠}{٤١٣٣٠} = ٠,٥٣٦$

$\frac{\overline{هـ}_ش}{\overline{هـ}} = ١,٣٩٠ - ٤,٠٢٧ (٠,٥٣٦) + ٥,٥٣١ (٠,٥٣٦)^٢ - ٣,١٠٨ (٠,٥٣٦)^٣ = ٠,٣٤٢$

ومن ثم فإن $\overline{هـ}_ش = ٠,٣٤٢ \overline{هـ} = ٠,٣٤٢ \times ٢٢١٥٠ = ٧٥٨٠$ كيلو جول / م^٢ فى اليوم

اليوم المفضل لحساب المتوسط اليومى لشهر يونيو هو يوم ١١ يونيو (وترتيبه ن = ١٦٢) وتحسب زاوية الميل الشمسى من العلاقة $\delta = ٢٣,٤٥$ جا $[\frac{٣٦٠}{٣٦٥}(٢٨٤+ن)]$

$= ٢٣,٤٥$ جا $[\frac{٣٦٠}{٣٦٥}(٢٨٤ + ١٦٢)] = ٢٣,١^\circ$

وتحسب زاوية الساعة عند الغروب $\omega_غ$ من العلاقة $\omega_غ =$ جتا$^{-١}$ [− ظا ϕ ظا δ]

$=$ جتا$^{-١}$ [− ظا ٤٠ ظا ٢٣,١] $= ١١١^\circ$

سنستخدم الآن العلاقة: $ن = \frac{ط}{٢٤}$ (أ + ب جتا ω) $\frac{جتا\ \omega - جتا\ \omega_غ}{جتا\ \omega_غ - (\frac{٢ ط \omega_غ}{٣٦٠})\ جتا\ \omega_غ}$

حيث ن = نسبة الإشعاع الكلى خلال ساعة، إلى الإشعاع الكلى خلال اليوم.

أ $= ٠,٤٠٩ + ٠,٥٠١٦$ جا $(\omega_غ - ٦٠)$

ب $= ٠,٦٦٠٩ - ٠,٤٧٦٧$ جا $(\omega_غ - ٦٠)$

$ن_ش = (\frac{ط}{٢٤}) \frac{جتا\ \omega - جتا\ \omega_غ}{جتا\ \omega_غ - (\frac{٢ ط \omega_غ}{٣٦٠})\ جتا\ \omega_غ}$

$ن_{ش}$ = نسبة الإشعاع الانتشارى خلال ساعة إلى الإشعاع الانتشارى فى اليوم

$\omega_{غ}$ = زاوية الساعة عند الغروب بالدرجات، ω زاوية الساعة بالدرجات عند منتصف الساعة بالحساب نحصل على ن = ٠,١١٠ يوم / ساعة

$ن_{ش}$ = ٠,١٠٢ يوم / ساعة

متوسط الإشعاع الكلى خلال ساعة = ٠,١١٠ x ٢٢١٥٠ = ٢٤٤٠ كيلو جول /$م^{٢}$

ومتوسط الإشعاع الانتشارى خلال ساعة = ٠,١٠٢ x ٧٥٨٠ = ٧٧٣ كيلو جول/$م^{٢}$

بعض الاستخدامات المهمة:

التجفيف بالطاقة الشمسية:

يمثل التجفيف بالشمس أسلوبًا تقليديًا فى حفظ المأكولات، وتزيل عملية التجفيف الرطوبة وتعين على الحفاظ على المنتجات الغذائية، والأسلوب العتيق منذ القدم لتجفيف المحاصيل الغذائية لدى الدول النامية يعتمد على نشر المنتجات مكشوفة تحت الشمس المباشرة فى شكل طبقات رقيقة وهو ما قد يسمى بالتجفيف الشمسى المكشوف أو التجفيف الطبيعى.

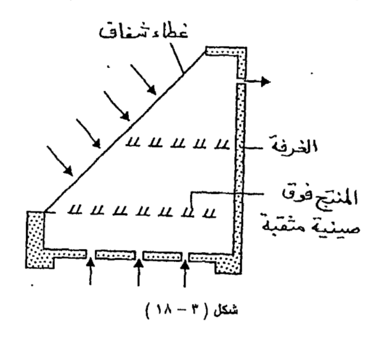
ويعيب هذه الطريقة البطء وتلوث المنتجات بالحشرات والغبار.

وفى التحكم التقليدى فى عملية التجفيف تكون الكهرباء هى مصدر الطاقة أو النفط أو الغاز الطبيعى أو الفحم، وفى الوسع تسخير الطاقة الشمسية فى تجفيف المحاصيل لتحقيق أكبر وفر اقتصادى ممكن، وقد جرت محاولات فى الماضى فى هذا الاتجاه.

ويعنى التجفيف المحكوم فى الواقع التحكم فى متغيرات عملية التجفيف مثل درجة حرارة الهواء ونسبة الرطوبة والمحتوى منها ومعدل التجفيف ومعدل سريان الهواء، وعلى ذلك فلابد لدى تصميم المجفف الشمسى من أخذ جميع هذه المتغيرات فى الحسبان إلى جانب صلاحية معدات التجفيف.

وتصنف كل المجففات على أساس أسلوب تشغيلها إلى فئتين:

مجففات بتيارات الحمل الطبيعية والمجففات بالتيارات الاصطناعية، ويبدو تشغيل المجففات التى تعمل بتيارات الحمل الطبيعية أكثر جاذبية فى البلاد النامية، حيث إنها لا تحتاج لأى نوع من المراوح أو نافخات الهواء التى تعمل بالطاقة الكهربية، علاوة على قلة تكاليفها وسهولة تشغيلها، إلا أن هناك مشكلات فى استعمال هذه المجففات، تتلخص فى بطء التجفيف، وصعوبة التحكم فى درجات الحرارة والرطوبة وقلة الكميات التى يمكن تجفيفها، علاوة على أن تعرض بعض المنتجات المباشر للشمس يحدث بها تغيرًا فى اللون أو الطعم.

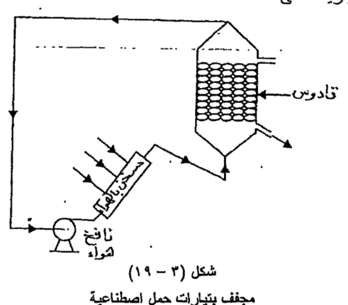


شكل (٣ – ١٨)

مجفف على شكل غرفة صغيرة

ويبين شكل (٣ – ١٨) مجففًا فى شكل غرفة صغيرة، وهو يتكون من حيز مقفل ذى غطاء شفاف، وتوضع المادة المراد تجفيفها فوق صينية مثقبة، ويمتص الإشعاع الشمسى الذى ينفذ لداخل الحيز بداخل المنتج نفسه، وكذلك بأسطح الحيز المغلق الداخلية المحيطة، ونتيجة لذلك تطرد الرطوبة من المنتجات فى حين يسخن الهواء الداخلى، وتكفل الفتحات الملائمة الموجودة بالقاع والسقف دوران تيارات الحمل الطبيعية، وتتراوح درجة الحرارة التى يمكن الحصول عليها عمومًا ما بين ٥٠، ٨٠° وتتراوح فترة التجفيف ما بين يومين وأربعة أيام، و تجفف الأعناب وغيرها من نوعيات المنتجات بهذه الطريقة.

أما فى المجفف من نوع التيارات الاصطناعية فيستعمل نوع من نافخات الهواء الكهربية أو الميكانيكية فى تحريك الهواء داخل الحيز، ولعمليات التجفيف على نطاق كبير يستعمل مجفف بتيارات الحمل مثل الموضح بشكل (٣ – ١٩)، وفيه يسخن الهواء منفصلا فى مسخن شمسى ثم يدفع فى مجار إلى الغرفة التى يخزن فيها المنتج المراد تجفيفه، ويصلح هذا النوع من المجففات مع حبوب المحاصيل الغذائية والكثير من المنتجات الأخرى كالشاى والتوباكو، وهى أسرع وذات كفاءة حرارية أعلى.



شكل (٣ – ١٩)

مجفف بتيارات حمل اصطناعية

تحلية المياه (إزالة الملوحة) بالطاقة الشمسية:

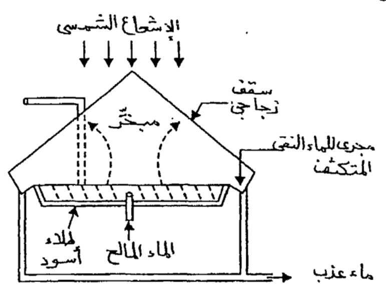
مياه الشرب حاجة أساسية لكل الأفراد، ولا تتاح المياه الصالحة للشرب في كثير من بلدان العالم.

وتسمح الطاقة الشمسية فى حالة توافرها باستعمالها فى التزويد بمياه الشرب، وباستخدام المعدة المعروفة باسم جهاز التقطير الشمسى **solar still** يمكن إزالة الملوحة من الماء غير النقى عن طريق الطاقة الشمسية.

والتحلية بالطاقة الشمسية والقائمة على أساس تقنية المجمع ذى الصفائح المسطحة تستخدم لتحويل المياه العكرة ومياه البحر إلى مياه صالحة للشرب، وفى تقنية التقطير الطبيعى بالشمس، يتبخر الماء بفعل الطاقة الشمسية ويتكثف بصورة طبيعية فى صورة صالحة للشرب، وهى تقنية ملائمة لإمداد المناطق الساحلية والأجزاء الكبيرة المنعزلة التى لا يصلح ماؤها للشرب، والماء المقطر من جهاز التقطير الشمسى يمكن استعماله بالمثل فى تغذية الحاشدات (البطاريات).

ويتكون جهاز التقطير الشمسى من النوع التقليدى (شكل ٣ – ٢٠) من حوض ضحل معزول (وأحيانًا غير معزول) مبطن أو مطلى بمادة سوداء مضادة للماء يحتوى على ارتفاع غير عميق (من ٥ إلى ٢٠سم) من الماء المالح أو قليل الملوحة المطلوب تقطيره، والحوض مغطى بلوح مفرد أو مزدوج من الزجاج أو البلاستيك مدعم بإطار مناسب محكم الغلق بحيث يقلل من تسرب البخار، ويمتد مجرى الماء المتكثف بطول الحافة السفلى للغطاء الزجاجى أو البلاستيكى ويتجمع به الماء المقطر فيحمله إلى خارج جهاز التقطير، وتستعمل ماسورة لملء الحوض بالماء المالح وأخرى للتحكم فى منسوب الماء المالح وتستخدم بالمثل فى إغراق المحلول الملحى بالماء، ويمكن أن يغذى جهاز التقطير بالماء المالح بصفة مستمرة

أو متقطعة، إلا أن معدل التغذية يحافظ عليه عمومًا عند ضعف معدل الماء المقطر الناتج فى الجهاز، إلا أن الأمر يعتمد على درجة الملوحة الابتدائية، وتعتمد نسبة مقدار الماء المالح وماء الغمر على ملوحة ماء الحوض، وقد وجد أنها تتناسب مع مقدار الماء العذب المنتج، ويشيد جهاز التقطير فى منطقة مكشوفة بحيث يواجه محوره الطولى الاتجاه الشرقى – الغربى.



شكل (٣ – ٢٠)

رسم تخطيطى لجهاز تقطير شمسى من نوع الحوض الضحل

وفى أثناء عملية التقطير يمتص الإشعاع الشمسى – بعد نفاذه خلال الغطاء الشفاف – داخل الماء والحوض، فترتفع درجة حرارة الماء مقارنة بالغطاء، ويفقد الماء الحرارة نتيجة التبخر وتيارات الحمل والإشعاع إلى الغطاء، ونتيجة التوصيل خلال أرضية الجهاز وحوافه. ويزيد الماء المتبخر من الحوض، من محتوى الرطوبة داخل الجهاز، وفى نهاية المطاف يتكثف على الوجه الداخلى للوح الزجاجى وينزلق لأسفل صوب مجارى التكثف ومنها إلى خارج الجهاز للاستعمالات المختلفة.

وأجهزة التقطير الشمسى ذات السعات النمطية تغل من ٢ – ٤ لتــرات مــن الماء المقطر فى اليوم لكل متر مربع من المساحة، والاستعمال المثــالى لهــا فــى مجموعات كبيرة قادرة على إمداد المناطق النائية بماء الشرب، والماء اللازم لــشحن البطاريات، وللمراكز الصحية الصغيرة وللعيادات الطبية وما إلى ذلك، ولما كانــت أجهزة التقطير هذه تعمل على أساس الفرق فى ضغوط البخار بــين الجــو وســطح الماء، فإنها تعطى مردودًا أعلى فى المناخ الجاف، وقد وجدت لها إنتاجية طيبة حتى فى الأجواء شديدة البرودة مثل إقليم "لاداخ" بالنظر لانخفاض رطوبة جوه.

أجهزة الطهى الشمسية:

يشبه جهاز الطهى الشمسى، ذلك الذى اعتدنا على استعماله فــى مطابخنــا لطهى الطعام، فيما عدا أنه لا يحتاج لأى نوع من الوقــود كالخــشب أو أقــراص الروث أو غاز الطهى، أو الفحم أو الكيروسين أو غيرها، فهــو يعمــل بالطاقــة الشمسية فحسب، ولا يخلف جهاز الطهى الشمسى أى دخان أو رماد، مما يحــافظ على نظافة البيئة، كما أنه يوفر مصادر الطاقة التقليدية الثمينة للبلاد علاوة علــى مردوده الاقتصادى.

نظرية عمل جهاز الطهى الشمسى:

تنقسم أجهزة الطهى الشمسى إلى فئتين:

أ – النوع ذو الصندوق الساخن: وفيه يستغل الجهــاز الطاقــة الحراريــة الشمسية بدون تركيز للأشعة أو بتركيز قليل.

ب – أجهزة طهى توجه الطاقة الشمسية (أشعة الشمس) من سطح عــريض إلى مساحة أصغر، ومن ثم لدرجة حرارة أعلى.

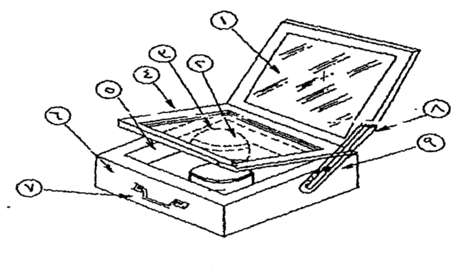
ويتركب جهاز الطهى الشمسى ذو الصندوق الساخن من صندوق معــزول جيدًا، ومطلى من الداخل بطلاء أسود غير لامع، وله غطاء شفاف (ذو جدار مفرد أو مزدوج) يحفظ الحرارة داخل الجهاز (شكل ٣ – ٢١) ويسمح هــذا الغطــاء بالإشعاع الحرارى من الشمس أن ينفذ إلى الداخل، ولكنه لا يسمح للحــرارة بــأن تتسرب من خلال السطح الممتص الأسود الساخن إلى خارج الصندوق، وبفــضل هذا التصميم ترتفع درجة الحرارة داخل الصندوق بسبب السطح الأســود المطلــى إلى ١٤٠ْم تكفى لعمليات الطهى.

ويستخدم النوع الثانى من أجهزة الطهى الشمسى عدســة أو عاكــسًا يلائــم تصميمه تركيز الإشعاع الشمسى (أشعة الشمس) فى مساحة صغيرة، وبوسع هــذا الجهاز أن يصل لدرجات حرارة أعلى لسطحه الممتص إذا أحسن تصميمه، إلا أن هذا النوع من أجهزة الطهى يفوق فى تكاليفه الأجهزة ذات الصندوق الساخن.

وصف تركيب جهاز الطهى الشمسى ذى الصندوق الساخن:

يتكون الجهاز من الأجزاء الآتية:

١ – الصندوق الخارجى.
٢ – الصندوق الداخلى.
٣ – العازل الحرارى.
٤ – الغطاء الزجاجى المزدوج.
٥ – مرآة.
٦ – أوعية الطهى.



شكل (٣-٢١)

١ - مرآة مستوية ٢ - وعاء الطهى ٣ - لوح زجاجى ٤ - الغطاء

٥ - مادة عازلة (زجاج) ٦ - الصندوق الخارجى ٧ - مقبض

٨ - حامل المرآة ٩ - دليل ضبط بمفصلة

١) **الصندوق الخارجي:** يكون لصندوق جهاز الطهى الشمسى الخارجى تصميم وأبعاد ملائمان ويصنع من الخشب أو الألواح الحديدية أو البلاستيك المقوى بالألياف.

٢) **الصندوق الداخلى:** يمكن أن يصنع الصندوق الداخلى من الحديد المجلفن أو ألواح من الألومنيوم الكربونى، وتطلى جوانبه الداخلية وأرضيته المعرضة للشمس بطلاء أسود غير لامع (عادة ما يستخدم الطلاء المستعمل للسبورات).

٣) **العازل الحرارى:** يملأ الفراغ ما بين الصندوقين الخارجى والداخلى بمادة عازلة مثل الصوف الزجاجى أو الثرموكول **Thermocole** وما إلى ذلك، لمنع الفاقد الحرارى من جهاز الطهى.

٤) **الغطاء الزجاجى المزدوج:** يزود جهاز الطهى الشمسى بغطاء زجـاجى مزدوج، ولمثل هذه الأغطية أبعاد أكبر قليلا من الغطاء الداخلى، وتثبت فى إطار خشبى يحفظ فراغًا صغيرًا بين الطبقتين الزجاجيتين ، وهـذا الفراغ البينى يحتوى على هواء يعمل كعازل ومانع لتسرب الحـرارة. ويتصل الإطار الخشبى بالصندوق الخارجى بمفصلات ويحفظ فراغًـا صغيرًا بين الطبقتين الزجاجيتين وهذا الفراغ وهناك شريحة مطاطيـة مثبتة حول حواف هذا الإطار لمنع أى تسرب حرارى.

٥) **المرآة:** تستعمل مرآة مستوية بسيطة فى جهاز الطهى الشمسى لزيـادة الإشعاع الشمسى الوافد على السطح الممتص، وتنعكس أشعة الـشمس الساقطة على المرآة منها وتدخل الصندوق بعد مرورها خلال الغطـاء الزجاجى المزدوج، ويمكن لهذه المرآة أن تزيد من الإشعاع الشمـسى الوافد إلى الجهاز بنسبة ٥٠% تقريبًا.

٦) **أوعية الطهـى:** تصنع أوعية الطهى المغطاة عامـة مـن الألومنيـوم، وأحيانًا من الصلب الذى لا يصدأ، وتطلى الأسطح الخارجية للأوعيـة بطلاء أسود غير لامع بحيث تمتص الإشعاع مباشرة.

مزايا أجهزة الطهى الشمسى:

لأجهزة الطهى الشمسى عدد من المزايا مقارنة بـأجهزة الطهـى التقليديـة نجملها فيما يلى:

١) يمكنها طهى أربعة أو خمسة أصناف فى ذات الوقت.

٢) مع درجة حرارة الطهى المنخفضة، تحافظ هذه الأجهزة علـى القيمـة الغذائية للأطعمة.

٣) لا تحتاج إلى مراقبة مستمرة.

٤) توفر الوقود.

٥) توفر النقود.

٦) خالية من التلوث.

٧) آمنة.

٨) توفر الوقت لربة المنزل.

٩) تحافظ على البيئة.

١٠) تحتفظ بالطعام ساخنًا لمدة طويلة.

محاذير استخدام أجهزة الطهى الشمسية:

رغم ما لها من مزايا متعددة تحد العوامل الآتية من استخدام أجهزة الطهى الشمسية:

١) لا يمكن استخدامها ليلا.

٢) لا تعمل جيدًا فى الجو ذى السحاب، ولكنها فى كثير من الأحيان تحتفظ بحرارتها بما يكفى لبقاء الأطعمة ساخنة.

٣) لا يمكن استعمالها فى إعداد كميات ضخمة من الأطعمة.

٤) لا يمكن استعمالها فى القلى.

الأصناف التى تطهى فى الأجهزة الشمسية:

هناك عدد كبير من الأصناف التى يمكن طهيها فى الأجهزة الشمسية مما يشيع فى حياتنا اليومية مثل:

١ – الأرز، الكيتشيرى(*)، البولاو(**)، الأرز المحلى... إلخ.

٢ – كل أنواع الدال(***).

٣ – جميع أصناف الحبوب الغذائية **Cereals**.

٤ – جميع أصناف الخضروات.

٥ – الخبز والكعك والبسكويت... إلخ.

٦ – الإيدلى(****) والدهوكلا(*****) والهاندفا(******)... إلخ.

٧ – المخللات وأصناف المربى... إلخ.

الأوقات اللازمة للطهى فى الأجهزة الشمسية:

تستغرق الأجهزة الشمسية ما بين ساعتين وثلاث ساعات لطهى المواد الغذائية اعتمادًا على المناخ وعلى نوع الطعام، ويقل الوقت اللازم صيفًا عنه فى الشتاء.

(*) الكيتشرى **Kichri**: طعام من الأرز والعدس (المترجم)

(**) البولاو **Pulae**: طبق آسيوى يحمر فيه الأرز أو القمح فى الزيت حتى يتحول لونه إلى البنى بتقليبه مع البصل المحمر (المترجم)

(***) الدال **dal**: طعام يجهز من الفول المجفف والعدس وغيرها ويؤكل عادة مع الأرز والخضروات (المترجم)

(****) الإيدلى **idli**: كعكة هندية من العدس والأرز تؤكل عادة فى الإفطار (المترجم)

(*****) الدهوكلا **dhokla**: طبق شهير فى غرب الهند مكون أساسًا من الدقيق البنغالى (المترجم)

(******) الهاندفا **handva**: وجبة مكونة من الأرز والدال والفول (المترجم)

المدة اللازمة للطهى	نوع الطعام
١ ساعة	١ – الخضروات
١,٥ ساعة	٢ – الأرز – المنج... إلخ
ساعتان	٣ – الخبز – البسكويت، الكعك... إلخ
٢ – ٣ ساعات	٤ – الحبوب الغذائية

تعليمات الطهى:

من الضرورى مراعاة النقاط التالية عند الطهى فى الأجهزة الشمسية:

١) استعمل الحد الأدنى من المياه اللازمة لعملية الطهى.

٢) ينبغى تقطيع الخضروات إلى قطع صغيرة، ولا حاجة لإضافة المياه فى طهى الخضروات.

٣) فى وقت الطهى احتفظ بالوعاء وغطاؤه مغلق.

٤) لا يجب أن يتعدى منسوب الماء ومحتويات الإناء نصف ارتفاعه.

٥) بمجرد وضع الإناء داخل الصندوق، لا ينبغى رفع الغطاء.

٦) بعد عملية الطهى نظف الجهاز وجففه بقطعة من القماش ثم أغلقه.

٧) بعد الانتهاء من عملية الطهى اكشف الغطاء بالكامل.

المتاعب المحتملة مع أجهزة الطهى الشمسية:

المشكلة	الأسباب	العلاج
عدم الوصول إلى درجة الحرارة المتوقعة أو عدم إتمام عملية الطهى	أ- تآكل الطلاء الأسود أو تقشره ب- انكسار الغطاء الزجاجى جـ- انكسار المرآة أو رداءتها د- تسرب الحرارة من جهاز الطهى هـ- عدم إحكام اللوح الممتص و- تجمع ذرات من الغبار فوق السطح الزجاجى ز- عدم نظافة السطح الممتص لجهاز الطهى ح- تكرار فتح الغطاء	أ- اطل السطح الممتص ووعاء الطهى بطلاء سبورة أسود غير براق ب- استبدل الغطاء الزجاجى. جـ- استبدل المرآة أو اطلها بطلاء فضى د- اعثر على موضع التسرب واستبدل مادة العزل هـ- ضع جهاز الطهى بطريقة سليمة بحيث يسقط أكبر قدر من الإشعاع على السطح الممتص و- نظف زجاج الغطاء بالقماش ز- نظف السطح الممتص بقطعة من القماش ح - لا تكشف الغطاء بعد وضع المواد الغذائية داخل الجهاز

الباب الرابع

معدات تجميع الطاقة الشمسية

مقدمة:

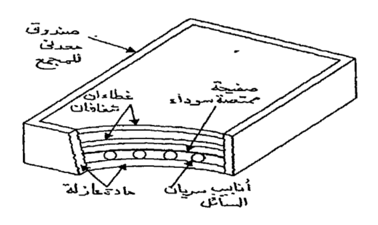
معدات تجميع الطاقة الشمسية هى مبادلات حرارية تحول الإشعاع الشمسى إلى طاقة داخلية فى المادة الناقلة الوسيطة، وهناك نوعانْ من مجمعات أشعة الشمس: المجمعات ذات الصفائح المسطحة، والمجمعات بالتركيز. ومساحة المجمع ذى الصفائح المسطحة هى نفسها المساحة المعرضة للإشعاع الشمسى وهى نفس المساحة التى تمتص، أما المجمع بالتركيز فله عادة سطوح مقعرة عاكسة تتعرض لأشعة الشمس وتركزها نحو بقعة أصغر مساحة تتلقاها، مما يرفع من فيض الإشعاع.

والطاقة الشمسية متاحة خلال ٦ – ٨ ساعات من النهار وإن اختلفت خلالها شدتها ما بين الصباح والمساء، ويتراوح مقدار الطاقة الشمسية التى يستقبلها سطح مستو فى اليوم ما بين ٥، ٧,٥ كيلووات ساعة لكل متر مربع فى أغلب مناطق الهند، وعلى أية حال فيعتمد المقدار الكلى على الفصل المناخى من العام وعلى حالة السماء خلال أوقات النهار، وكمتوسط عام يصل عدد الأيام الصافية نحو ٣٠٠ يوم على مدار السنة فى معظم نواحى البلاد، وعلى ذلك يتلقى كل متر مربع فى المتوسط ١٥٠٠ كيلو وات ساعة من الإشعاع الشمسى سنويًا، وهو مقدار هائل من الطاقة.

وتوفر الطاقة الشمسية أفضل الفرص للاستعاضة عن الوقود الأحفورى، وعلى سبيل المثال، فمنظومة تسخين مياه ذات سعة ١٠٠ لتر يمكنها أن توفر – على الأقل – ٢١٣٨ كيلو جرامًا من الخشب أو ٢٢٣٠ كيلو وات ساعة من الطاقة الكهربية سنويًا، وعلى ذلك فهناك مجال واسع لاستنقاذ الوقود الأحفورى من خلال استعمال معدات التسخين بالشمس.

المجمعات المسطحة للطاقة الشمسية:

يصور شكل (٤ – ١) رسمًا لمجمع طاقة شمسية مسطح، وفيه يمر الإشعاع الشمسى خلال الغطاء الشفاف أو الأغطية الشفافة فيصطدم بالصفيحة المطلية بالسواد ذات الامتصاصية[*] العالية، فيتم امتصاص جزء كبير من الطاقة بواسطة الصفيحة وينتقل إلى المادة الوسيطة فى أنابيب سريان المائع التى تحمله بعيدًا فى صورة طاقة قابلة للاستعمال، والسطح السفلى لصفيحة الامتصاص وجوانب الصندوق الخارجى معزولان جيدًا، بما يكفل التقليل من الفاقد بالتوصيل الحرارى، والوسط الناقل إما سائل أو غاز (الماء أو الهواء عادة) وشكل (٤ – ١) يمثل مجمعًا مسطحًا للطاقة الشمسية ذا وسط ناقل سائل.



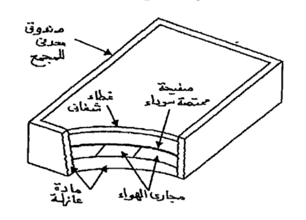
(شكل ٤ – ١)

مجمع مسطح للطاقة الشمسية بوسط ناقل سائل

(*) الامتصاصية أو القابلية للامتصاص **absorptivity** هى نسبة الإشعاع الذى يمتصه السطح من الإشعاع الكلى الساقط عليه (المترجم)

ومن الممكن أن تلحم أنابيب السائل بصفيحة الامتصاص، ويمكن أن تكــون جزءًا متكاملا مع الشريحة، وتتصل أنابيب السائل ببعضها عند كلا الجانبين بأنبوبة تجميع كبرى **header**.

وفى حالة مجمعات الطاقة الشمسية المسطحة التى يستعمل فيها الهواء (شكل ٤ – ٢) يسرى الهواء أسفل صفيحة الامتصاص، بحيث يتلامس مع كل ســطحها تقريبًا للرفع من كفاءة عملية الانتقال الحرارى، ويستعمل الغطاء الــشفاف للتقليــل من الفاقد بتيارات الحمل خلال طبقة الهواء الساكن ما بين صــفيحة الامتــصاص والزجاج، كما أنه يقلص من الفاقد بالإشعاع من المجمع، حيث إن طيــف قابليــة الزجاج للانتقال خلاله شفاف بالنسبة لموجات الإشــعاع القــصيرة المنبعثــة مــن الشمس، والتى تعكسها السماء فى حين أنها معتمة تقريبًا بالنسبة لموجات الإشــعاع الحرارى الطويلة المنبعثة من أسطح المجمع الداخلية.



(شكل ٤ – ٢)

مجمع مسطح للطاقة الشمسية بوسط ناقل غازى (هواء)

ولدى استعمال غطاءين شفافين أو أكثر، يقل أكثر وأكثر الفاقــد بالإشــعاع والحمل... وتلعب الأغطية الشفافة دورًا له أهميته فى تقليص الفاقد الحرارى مــن المجمع، كما أنها تعمل على إنقاص فقدان الإشعاع الداخل الساقط علــى صــفيحة

المجمع، وعند مستويات درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة غالبًا ما يستخدم مجمع مزجج **glazed** مفرد يعطى كفاءة أعلى من مجمع مزجج ثنائى **double glazed**.

وعادة ما تكون المجمعات المسطحة مثبتة فى موضعها فى غير ما حاجة إلى توجيهها صوب أشعة الشمس، وينبغى أن توجه رأسا نحو خط الاستواء المواجه للشمال (فى نصف الكرة الأرضية الجنوبى) أو المواجه للجنوب (فى نصف الكرة الشمالى) وللاستخدامات المستمرة على مدار العام تساوى زوايا الإمالة **tilt angle**، الأكثر ملاءمة، زاوية خط العرض، وفى الشتاء يتوجب أن تزيد زاوية الميل على زاوية خط العرض بحوالى ١٠ – ١٥ درجة، فى حين ينبغى أن تقل عنها – صيفًا – بنفس المقدار، وليس لزاوية الميل المثلى للسطح ولا سمت السطح تأثير بالغ، فانحراف قدره نحو ١٠ درجات عن القيم المثلى لا ينجم عنه إلا نقصان طفيف فى الطاقة السنوية المتاحة.

وتفيد المجمعات ذات الصفيحة المسطحة فى الإمداد بالطاقة الحرارية فى نطاق درجات الحرارة المعتدلة وحتى درجة غليان الماء الطبيعية (١٠٠ ْم)، وبالوسع تخفيض فواقد الإشعاع من صفيحة امتصاص مجمع الطاقة الشمسى بصورة ملموسة حين يكون للسطح الماص خواص إشعاع انتقائية، ولهذه الأسطح الانتقائية قابلية امتصاص عالية فى نطاق الأطوال الموجية للإشعاع الشمسى، وقابلية منخفضة للانبعاث عند الإشعاع الحرارى ذى الموجات الطويلة.

وليس متاحًا فى الطبيعة مادة ذات خواص انتقائية، بل تصنع الأسطح الانتقائية البسيطة من طبقة بالغة الرقة من أكسيد معدنى أسود يطلى به سطح أصلى من معدن لامع، وسمك الطلاء الأسود يكفل له أن يكون ماصًا جيدًا لطاقة الشمس، ومعدن الأساس اللامع قليل القابلية لبعث الإشعاع الحرارى، كما أن طبقة الطلاء الرقيقة شفافة لهذا الإشعاع، وهاتان الصفتان تقللان من الإشعاع الحرارى،

والأسطح الانتقائية ذات الفاعلية تبلغ امتصاصيتها زهاء ٩٥% وانبعاثيتهـا نحـو ١٠%.

وبالإمكان تقليص الفواقد بالانعكاس من غطـاء مجمـع الطاقـة الشمـسية الزجاجى بدرجة ملموسة بإضافة طبقة سطحية رقيقة ذات معامل انكسار يقع وسطًا بين معاملى الانكسار فى الزجاج والهواء، ويمكن إجراء معالجة حرارية للـسطح بغمر الزجاج فى محلول حامض الفلوسيليسيك **fluosilicic acid** المـشبع بالـسليكا لتخليق طبقة رقيقة على السطح من السليكا المسامية، ومن شأن مثل هذه المعالجـة أن تقلل فاقد الانعكاس الشمسى من مستواه المعتاد (٨% فى ظروف سقوط الأشعة الاعتيادية على الزجاج العادى) إلى ١% عند استخدام طبقة مزدوجة.

ويجرى التحكم فى امتصاص الزجاج للإشعاع من خلال الشوائب من أكسيد الحديد المتواجدة بالزجاج، كما تتحكم نسبة الحديد المحتوى فى لون الزجاج حـين مشاهدته من عند الحافة، فزجاج النوافذ العادى يبدو ذا اخضرار، ومثل هذا اللـوح الزجاجى قد يمتص ما بين ٥، ١٠% من الضوء الساقط، وعلى الجانـب الآخـر يمتص لوح الزجاج (الأبيض) الذى يحتوى نسبة منخفضة من الحديد أقل من ١% من الضوء الساقط.

أنواع الطلاء الأسود:

من أجل تحويل الإشعاع الشمسى الساقط على منظومة الامتـصاص إلـى حرارة ينبغى طلاء المجمع بطلاء أسود اللون أو أية مادة شبيهة أخرى. والطلاء الأمثل للمجمع، هو ذلك الذى يمتص أغلب الإشعاع الساقط عليه، ولا ينبعث منـه شىء فى نطاق الموجات الطويلة من الطيف الكهرومغناطيـسى. وتمـتص مـواد الطلاء السوداء المستعملة عادة حتى ٩٥% من الإشعاع الشمسى الساقط، بيـد أن

انبعاثيتها فى درجات الحرارة العالية تتجاوز بالمثل ٩٠ %، وهو ما يعنـــى فاقـــدا هائلا فى الحرارة، لا يسمح لهذه الممتصات بالوصول إلى درجـــات أعلـــى مـــن ١٢٠-١٣٠ ْم. ومن ثم فليس بالإمكان استعمال مثل هذه المجمعات فى التطبيقـــات فوق درجة ٦٠-٦٥ ْم، إذ أن كفاءتها تتدنى بشدة فوق هذا النطاق. والنوع الآخـــر من مواد الطلاء المسماة بالمواد الانتقائية ذو امتصاصية عالية وانبعاثية منخفـــضة حتى فوق ١٠٠ ْم، ومن هنا كان استعمالها لتسخين الماء لما فوق ٧٠ ْ م.

ولابد أن تتمتع مادة الطلاء بخاصية الالتصاق وبمقاومة عالية للتقلبات فـــى درجات الحرارة ونسب الرطوبة، وكذلك فى شدة الإشعاع الساقط.

تزجيج المجمع Collector Glazing

للغطاء الشفاف فوق مادة المجمع الممتصة، وظيفة السماح للإشعاع الشمسى بالنفاذ خلاله، كما يقوم بدور الستار المعتم بالنسبة للإشعاع المنبعث من الممـــتص الساخن. وعلاوة على ذلك فإنه يتجنب أو يقلل من الفاقد الحـــرارى بالحمـــل مـــن صفيحة الامتصاص.

والتزجيج الأمثل للممتص يجب أن تكون له السمات الآتية:

١) الحد الأقصى من النفاذية **Transmissivity** للإشعاع الشمسى (مـــن ٠,٣ إلى ٢ ميكرون).

٢) الحد الأدنى من النفاذية للإشعاع ذى الموجة الطويلـــة (أطـــول مـــن ٢ ميكرون)

٣) توصيلية حرارية **Conductivity** منخفضة.

٤) مقاومة عالية لظروف الطقس.

والزجاج المطاوع هو مادة ممتازة لآخر طبقات التزجيج من الخارج. وعملية التطويع لازمة لإضفاء المتانة المطلوبة. والزجاج مادة طويلة العمر، شديدة التحمل ومقاومة عالية جدا لعوامل الطقس. ويوصى باستعمال الزجاج ذى المحتوى المنخفض من الحديد فى تطبيقات الأجهزة الشمسية.

النفاذ خلال الغطاء:

يتوقف مقدار الطاقة الشمسية التى تمر خلال الغطاء على الخواص الفيزيائية للمادة المستعملة وعلى درجة نظافة سطحه.

أ – الغطاء الزجاجى:

ينفذ لوح نظيف من زجاج النوافذ العادى زهاء ٨٤% من الطاقة الساقطة على سطحه، وأحياناً ما يختار زجاج ذو محتوى منخفض من الحديد، فهو أقل امتصاصًا للإشعاع، ويتسم الزجاج عالى المحتوى من الحديد (وبالتالى ذو النفاذية الأقل) بدرجة من الاخضرار فى لونه، والزجاج المطاوع مادة ممتازة لصناعة آخر طبقات التزجيج من الخارج.

ب – الأغطية البلاستيكية:

يمكن لبعض المواد البلاستيكية كالأكريليك النقى، والبى فى سى(*) والجى آربى(**) أن تنفذ من الطاقة مثل ما ينفذه الزجاج بل وأكثر. إلا أن العديد منها يفشل فى إحداث الاحتباس الحرارى (تأثير الدفيئة) لأنها لا تنفذ فقط الطاقة الشمسية، بل وكذلك الطاقة ذات الموجات الطويلة التى تشع من الممتص مرة

(*) بى فى سى **PVC**: اختصار لاسم مادة (الكلور متعدد الفينيل **Polyvinyl chloride**) (المترجم)

(**) جى آر بى **G R P**: اختصار لعبارة **Glass reinforced plastic** أى البلاستيك المقوى بالزجاج (المترجم)

أخرى عندما يسخن، ولا تمثل المواد البلاستيكية بحال أى توفير فى التكلفة لدى مقارنتها بالزجاج، وقد يؤدى ترقيق سمك الطبقات إلى صعوبات فى تركيبها، وقد نجمت مشاكل بالفعل فى الماضى من جراء تآكل الطبقات البلاستيكية بفعل الرياح وبالتالى زيادة الفاقد من الحرارة بالحمل، وربما يشيع فى المستقبل استعمال طبقة من التدلار **tedlar**(*) مع لوح من البوليستير الصلد معًا، إلا أنها لن تكون أرخص من الزجاج وإن تكن تتيح لمصنعها إمكانية نقل المجمعات المغطاة.

التزجيج المزدوج Double Glazing:

أحيانًا ما تستعمل طبقتان من الزجاج لتقليل الفاقد الحرارى من الشريحة الماصة، بيد أن هذا على كل حال يقلص من مقدار طاقة الإشعاع الشمسى الذى يصل للمجمع، ومن شأن طبقة من الزجاج سمكها ٤ ملليمتر أن تمرر ٧١% فحسب من الإشعاع الذى تتلقاه، والتزجيج المزدوج مجد فقط فى ظروف الارتفاع الشديد فى الفقد الحرارى، والاحتياج إلى تسخين الماء لدرجة تزيد عن درجة حرارة الهواء الخارجى بأكثر من ٣٥ °م، وفى حالة التزجيج لابد من إيلاء عناية خاصة لتثبيت الطبقة الداخلية، فهذه الطبقة ستتعرض لدرجة حرارة أعلى، ولابد لها من فراغ لتتمدد فيه، وإلا لتشققت.

تراكم القاذورات على غطاء المجمع:

من شأن تراكم الغبار على الغطاء أن يقلل من مقدار الطاقة المارة، ويمكن التقليل من حجم هذه المشكلة لأدنى حد باستعمال الزجاج الذى يتمتع بسطح أملس وصلد، إلا أن إمالة لوح الزجاج لمنع تراكم الغبار عليه قد يهبط بنفاذيته بحوالى

(*) هو مادة فلوريد البوليفينيل، وهى مادة ذات احتمال وخاصية التصاق عاليين (المترجم)

٢٠% ما لم ينظف بصورة منتظمة، وتعتمد النسبة المضبوطة على مقدار الغبار والمواد الملوثة المتواجدة فى الجو المحلى.

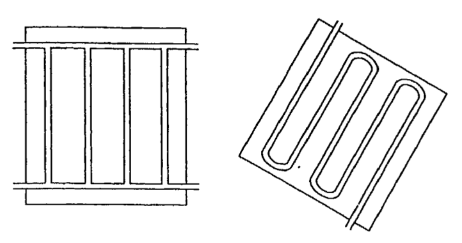
عملية امتصاص سطح الصفيحة للإشعاع:

يزداد امتصاص الصفيحة للإشعاع بطلائها بسطح من مادة سوداء من خليط معدنى خاص معالج بحيث يمتص بين ٨٠، ٩٨% من الإشعاع الواصل له، ولابد أن يكون السطح ناعمًا رقيق السمك حتى لا يشكل عائقًا أمام سريان الحرارة من الخارج إلى الداخل حيث تنتقل من هناك إلى تيار الماء المتدفق فى دورته.

الانتقال الحرارى من المجمع إلى الماء:

يمكن تعزيز عملية انتقال الحرارة بتصنيع الصفيحة الممتصة من مواد ذات توصيلية حرارية عالية، وبزيادة سطح التلامس بين الماء وأنبوب الماء، وبين أنبوب المياه والصفيحة الممتصة، ويحبذ فى الوقت الحالى فى المجمعات الشمسية، استخدام منظومة من الأنابيب والصفائح.

وباستخدام منظومة من الأنابيب والصفائح، تنبغى العناية فى حسن اختيار المادة، والمسافات بين الأنابيب والوصلة ما بين الأنبوبة والصفيحة، وترتيب الأنابيب يتوقف بالمثل على نوعية المنظومة التى يستعمل فيها المجمع والشكل الأفعوانى أو المتعرج قد يسبب معاوقة زائدة للانسياب فى منظومة تعتمد على السريان بتأثير الجاذبية، فى حين يفضى ترتيب الأنابيب فى شكل متوازٍ بين ماسورتى تجميع، إلى مشاكل نتيجة الانسدادات بالهواء.



شكل (٤ – ٣)

(أ) مجمع من أنابيب وصفائح ذو أنابيب أفعوانية ملتوية **(ب) مجمع من أنابيب وصفائح بشبكة توزيع من أنابيب متوازية**

ويتعين أن تسرى الحرارة فى المجمعات ذات الصفائح والأنابيب فى اتجاه عرضى لنقل الطاقة المتجمعة بالصفيحة الممتصة المستعرضة إلى الأنابيب الممتلئة بالماء، لذا فلابد من استعمال المواد جيدة التوصيل الحرارى فقط.

ومن بين المواد المتوفرة عادة يمثل النحاس الأحمر أفضلها، فله تقريبًا ضعف توصيلية الألومنيوم وزهاء ثمانية أضعاف توصيلية الصلب الطرى، وبالوسع زيادة توصيلية الألومنيوم والصلب للحرارة الممتصة بالتقريب بين الأنابيب، واستعمال صفائح أكثر سمكًا، فكلما ازداد سمك الصفيحة، قلت مقاومتها لسريان الحرارة خلالها(*).

والجدول الآتى يبين القيم المفضلة للسمك والمسافات بين الأنابيب فى حالات المواد المختلفة:

(*) طبقا لما ورد بالنص المترجم الأصلى (المترجم)

مادة التصنيع	السمك بالمليمتر	المسافة البينية بالمليمتر
النحاس الأحمر	٠,٢٥	١٣٨
الألومنيوم	٠,٥٠	١٣٣
الصلب	١,٠٠	١٠٠

ولكى يتحقق تلامس جيد حراريًا بين الأنبوبة والصفيحة ينبغى زيادة سطح التلامس إلى حده الأقصى، ويمكن إنجاز ذلك بتشكيل الصفيحة بحيث تحيط بالأنبوبة، وبتشكيل الأنبوبة بغرض توفير سطح تلامس أكثر استواءً.

والجدول التالى يبين التوصيلية الحرارية لبعض المواد المستعملة فى صناعة صفائح الامتصاص:

مادة التصنيع	التوصيلية الحرارية وات / متر درجة كلفن
النحاس الأحمر	٣٧٦
الألومنيوم	٢٠٥
الصلب الطرى	٥٠
الصلب غير القابل للصدأ	٢٤

العزل الحرارى للمجمع:

يتم عزل المجمعات الشمسية حراريًا بهدف تقليص الفقد الحرارى من السطح الخلفى لمنظومة الامتصاص وجوانبها، وحيث إن المجمعات عرضة

للاستعمال أو البقاء فى درجات حرارة تبلغ نحو ٢٠٠ °م، فيجب ألا يبلى العازل الحرارى، أو ينبثق منه غاز أو يتمدد أو ينكمش فى نطاق درجات الحرارة بين ٣٠، ٢٠٠ °م، وينبغى كذلك أن يتمتع باستقرار فى بنيته وألا يتجعد أو يتقوض بمضى الوقت، ولابد ألا يجتذب الرطوبة وأن يكون مضادًا للحرائق.

ومواد العزل الحرارى يجب أن تخلو من الكبريت والمواد الرابطة التى قد تنفث غازًا، أو تتبخر بين درجتى ٣٠، ٢٠٠ °م كما ينبغى أن تكون خفيفة الوزن.

الهيكل الخارجى للمجمع:

يزود المجمع بهيكل خارجى يقى العازل وصفيحة الامتصاص من الجو الخارجى ويقلل من الفاقد الحرارى إلى الحد الأدنى، وتستعمل لتصنيع هذا الهيكل مادة كالألومنيوم أو الصلب المجلفن أو الزجاج الليفى وما شابه، ومن الموصى به أن تستعمل ذات المواد لتصنيع القاعدة المقام عليها المجمع وهيكله الخارجى لتفادى التآكل الكيميائى بينهما، وإن كانت مثل هذه المشاكل لا تظهر بتصنيع الهيكل من الزجاج الليفى أو البلاستيك.

وينبغى أن يقاوم هذا الصندوق الخارجى التأثيرات المناخية، وكذلك إجهادات الأحمال المركبة عليه أو عمليات النقل والتداول.

ولابد أن يصمم كساء المجمع بأسلوب يمنع تراكم الماء المتكثف بكيفية قد تفسد قدراته الوظيفية، وينبغى أن يكفل تصميمه عدم تولد إجهادات مفرطة فى الغطاء أو الواجهة المزججة حتى مع أقصى درجات الحرارة ارتفاعًا. ووسائل منع التسرب والأجزاء الأخرى يجب أن تكون قادرة على تحمل تقلبات الطقس، وكذا تقلبات درجات الحرارة، أو ثباتها عند نفس القيمة لفترات طويلة.

توجيه المجمع:

من الأهمية بمكان أن يسقط الإشعاع عموديًا على سطح الامتصاص من أجل تقليل الفاقد نتيجة الانعكاس.

على أية حال، فإن موضع الشمس لا يبقى ثابتًا، بل يتغير مع الوقت من اليوم ومن السنة، وزاوية سقوط الأشعة على سطح الأرض بذلك تتوقف على تلك العوامل مثل خط عرض المكان والوقت من اليوم والسنة، ومن أجل ذلك يحتفظ بالمجمعات الشمسية على الدوام فى وضع مائل مواجه للشمس بحيث تتلقى الحد الأقصى من إشعاعها الشمسى وتحوله إلى حرارة، وزاوية الميل المثلى على السطح الأفقى تساوى زاوية خط عرض المكان مضافًا إليها ١٥ درجة خلال الشتاء أو مطروحًا منها ١٥ درجة خلال الصيف فى نصف الكرة الأرضية الشمالى، ولما كانت الشمس فى حركة دائمة بالسماء فينبغى – للحصول على أقصى مردود من المجمع – أن يتبع حركتها على الدوام.

ويلزم مقدار هائل من الطاقة الكهربية لكى تتحقق هذه المتابعة، وهو أمر غير عملى ولا ينصح به، ومن ثم فيحتفظ بالمجمعات ذات الصفيحة المسطحة فى وضع ثابت موجهة نحو الجنوب للاستفادة من أقصى كمية من الطاقة فى أثناء النهار، ولا يصنع الانحراف عن اتجاه الجنوب بزاوية ١٥ درجة كبير فرق فى إجمالى المردود الحرارى طوال اليوم.

ويعتمد الميل عن السطح الأفقى على الغرض الذى يستعمل فيه الماء الساخن، فإذا كانت الحاجة إلى درجات حرارة عالية أكثر صيفًا، فيكون الميل

مساويًا لزاوية خط العرض مطروحًا منها ١٥ درجة، ولتحقيق أقصى استفادة فـــى شهور الشتاء تساوى زاوية الميــل زاوية خط العرض مضافًا إليها ١٥ درجــــة، أما لتحقيق أقصى استفادة على مدار العام، فتحتفظ بزاوية ميل مساوية لزاوية خط العرض فى المكان.

تصميمات المجمع:

كثفت البحوث والتطوير نشاطها خلال السنوات القليلة الماضية، مما أفــرز العديد من التصميمات لمجمعات الطاقة الشمسية لمنظومات تسخين المياه، وتتنــوع نظم المجمعات هذه بصفة أساسية فى تصميم الجزء الممتص للطاقة، وفى شـــكل (٤ – ٤) بعض من هذه النظم وهى:

أ- الأنابيب المدموجة (المتضمنة).

ب- الأنابيب المركبة ناحية السطح غير المعرض.

جـ- الأنابيب المركبة ناحية السطح المعرض.

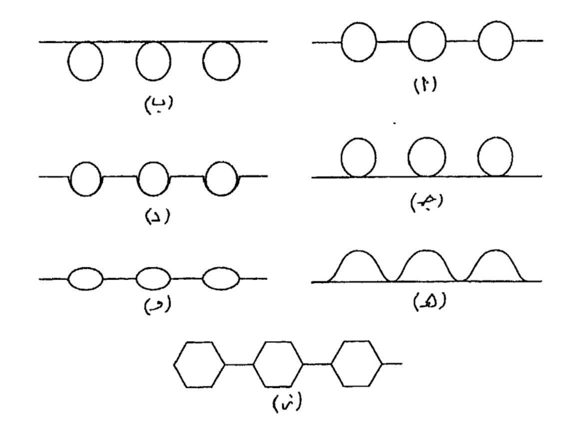
د- الأنابيب المركبة داخل أخاديد.

هـ- صفيحة متعرجة مثبتة على أخرى مسطحة مستوية.

و- صفيحتان متعرجتان من الناحيتين.

ز- أنابيب ذات مقطع سداسى.

ويبين شكل (٤ – ٤) رسمًا تخطيطيًا لكل من هذه التصميمات



شكل (٤ – ٤)

التصميمات المختلفة لمجمع

(أ) أنابيب مدمجة
(ب) أنابيب مركبة ناحية السطح غير المعرض
(ج) أنابيب مركبة ناحية السطح المعرض
(د) أنابيب مركبة داخل أخاديد
(و) صفيحتان متعرجتان من الناحيتين
(هـ) صفيحة متعرجة
(ز) أنابيب ذات مقطع سداسى

وقد اتبعت آليات متنوعة فى تثبيت الأنابيب على صفيحة الامتصاص بعضها مبين بشكل (٤-٤)، ومما يلاحظ أن الحرارة ستنتقل من صفيحة الامتصاص الساخنة إلى المائع الناقل للحرارة، والذى ينساب خلال الأنابيب أو المجارى، ولاستخلاص أكبر قدر من الحرارة من الممتص ينبغى أن يكون التماس بين الصفيحة

والأنابيب تامًا بقدر الإمكان، والمجارى المدمجة هى أفضل ما يحقق ذلك، والأنابيب التى تلحم بصفيحة الامتصاص تحقق هى الأخرى نفس القدر من الفاعلية بشرط جودة اللحام وعدم ترك ثغرة هوائية بين الصفيحة وأسطح الأنابيب، وعلى أية حال فلا يتيسر اللحام بين معدنين مختلفين كالنحاس الأحمر والألومنيوم.

ويشيع الآن استخدام صفائح الامتصاص المصنعة من الألومنيوم والأنابيب المصنعة من النحاس الأحمر، ويتم ربطهما معًا بوسائل ميكانيكية، ومن هنا لا تكون مثل هذه المجمعات بالكفاءة المرجوة حيث لا يمكن تحقيق تلامس تام بين السطحين، وتثبت الأنابيب فى مجار من الألومنيوم ثم يضمان معا بتقنيات الحرارة العالية والضغط.

ولم تتوفر هذه المنظومات – حتى الآن – بالهند، وإن انتشر استخدامها فى بلاد أخرى، ويتوقف انتقال الحرارة من وحدة الامتصاص على مدى القرب بين الأنابيب. فمن الناحية النظرية نحصل على أفضل أداء عندما تتلامس هذه الأنابيب، إلا أن مثل هذا الترتيب سيزيد من تكلفة المجمع، وعلى ذلك فهناك تصميم وسط أمثل يجمع ما بين حسن الأداء واعتدال التكاليف، وعادة ما يفصل بين الأنابيب بمسافة حوالى ١٠ سنتيمترات إذا كان قطرها حوالى ١,٢٠ سنتيمتر.

التبادل الإشعاعى بين الأسطح:

لدراسة تبادل طاقة الإشعاع بين سطحين يفصل بينهما وسط لا يمتصها، لنأخذ فى الاعتبار كيفية مواجهة السطحين لبعضهما وشكلهما الهندسى، بالإضافة إلى درجتى حرارتهما وخواص كل سطح، ويمكن ببساطة تحليل أثر الشكل الهندسى على تبادل طاقة الإشعاع بوضع تعريف لمعامل شكلى السطحين **Configuration Factor** (م٢١)، وهو يمثل الجزء من الإشعاع الذى يغادر السطح س١ والواصل للسطح س ٢.

وعند اعتبار تبادل إشعاعى بين سطحين أسودين تكون كمية الإشعاع المغادرة للسطح س$_{1}$ والواصلة للسطح س$_{2}$ = ط ب$_{1}$ س$_{1}$ م $_{21}$، والإشعاع المغادر للسطح س$_{2}$ ليصل السطح س$_{1}$ = ط ب$_{2}$ س $_{2}$ م $_{12}$، حيث ط ب$_{1}$، ط ب$_{2}$ هما القدرة الانبعاثية للجسم الأسود لكل وحدة مساحات، س$_{1}$، س$_{2}$ هما مساحتا السطحين اللذين ينتقل الإشعاع بينهما.

ويعطى صافى طاقة الإشعاع المتبادلة بالمعادلة:

ح $_{21}$ = ط ب$_{1}$ س$_{1}$ م$_{21}$ – ط ب$_{2}$ س$_{2}$ م $_{12}$ (٤–١)

فإذا كان للسطحين نفس درجة الحرارة فإن ط ب$_{1}$ = ط ب$_{2}$، ح $_{21}$ =٠. ومن ثم نحصل على العلاقة التبادلية: س$_{1}$ م$_{21}$ = س$_{2}$ م $_{12}$ (٤–٢)

والمعادلة (٤–٢) تعتمد اعتمادًا صرفا على الشكل الهندسى فى الطبيعة، وهى صحيحة لكل الأسطح الانتشارية بصرف النظر عن درجة حرارتها، ومن ثم فإن صافى التبادل الإشعاعى بين سطحين أسودين تحدده العلاقة

ح$_{21}$ = س$_{1}$ م$_{21}$ (ط ب$_{1}$ – ط ب$_{2}$) = س$_{2}$ م $_{12}$ (ط ب$_{1}$ – ط ب$_{2}$) (٤–٣)

وحيث أن ط ب = σ(*) د^{4}، فيمكننا كتابة المعادلة (٤–٣) فى الصورة

ح $_{21}$ = س$_{1}$ م $_{21}$ σ (د$^{4}_{1}$ – د$^{4}_{2}$) = س$_{2}$ م $_{12}$ σ (د$^{4}_{1}$ – د$^{4}_{2}$) (٤ – ٤أ)

حيث د$_{1}$، د$_{2}$ هما درجتا حرارة السطحين س$_{1}$، س$_{2}$ على الترتيب، ولما كانت (ط ب$_{1}$ – ط ب$_{2}$) هى فرق مستوى الطاقة المؤدى إلى انتقال الحرارة، فالمقدار $\frac{1}{\text{س}_1 \text{م}_{21}} = \frac{1}{\text{س}_2 \text{م}_{21}}$ يمثل (المقاومة) التى يتسبب فيها الشكل الهندسى للسطحين للسريان، (إذا ما شبهنا الأمر بدائرة كهربية).وعند تبادل الحرارة الإشعاعية بين سطحين غير أسودين، نأخذ فى الحسبان الانعكاسات

(*) الرمز σ هنا يدل على ثابت ستيفان بولتز مان (المترجم)

المتعددة على السطحين، وسنقصر مناقشتنا على أبسط الحـالات وهـى الخاصـة بسطحين معتمين رماديين لهما معامل انبعاث (ϵ) = معامل الامتصاص (α)، ومعامل انعكاسية (ρ) = ١ − α = ١ − ϵ، ولمثل هذين السطحين يعطـى معـدل الطاقـة الإشعاعية الكلية التى تغادر كل وحدة مساحة من سطح ما، وهى المسماة بالإشـعاعية (ش) **radiaosity** بالصيغة ش = ϵ ط ب + ρ .خ = ϵ ط ب + (١− ϵ) خ

والطاقة الإشعاعية الصافية (المحصلة) التى تغادر السطح هى الفرق ما بين الإشعاعية (ش) التى تغادر السطح والإشعاع **irradiation** خ الساقط على السطح، أى أن

Q = (ش − خ).س

وبحذف الإشعاع خ من المعادلتين السابقتين نحصل على:

$$Q = \text{س} \left[\text{ش} - \frac{\text{ش} - \epsilon \, \text{ط}_{\text{ب}}}{1 - \epsilon} \right] = \frac{\text{س} \, \epsilon}{1 - \epsilon} (\text{ط}_{\text{ب}} - \text{ش}) \quad (\text{٤−٤ب})$$

ويمكن اعتبار الطاقة الإشعاعية الصافية التى تغادر السطح الرمادى بمثابـة التيار فى دائرة كهربية مناظرة (شكل ٤ −٥) عندما يسلط فرق جهد قدره (ط ب − ش) عبر مقاومة كهربية مقدارها($\frac{1 - \epsilon}{\epsilon \, \text{س}}$)

وترجع هذه المقاومة إلى عدم اكتمال مثاليـة الـسطح كمـصدر لانبعـاث وامتصاص الإشعاع مقارنة بسطح أسود.

والآن، فلندرس طاقة الإشعاع المتبادلة بين سطحين رماديين بمـساحة س_1، س_2: فالإشعاع الذى يغادر س_1 ويصل إلى س_2 = $\text{ش}_1 \, \text{س}_1 \, \text{م}_{21}$، والإشعاع الـذى يغادر س_2 إلى س_1 = $\text{ش}_2 \, \text{س}_2 \, \text{م}_{12}$.

والإشعاع الصافى المتبادل بين السطحين =

$$\text{ص}_{21} = \text{ش}_1 \text{س}_1 \text{م}_{21} - \text{ش}_2 \text{س}_2 \text{م}_{12}$$

والآن باعتبار تبادلية العلاقات نحصل على $ص_{٢١} = س_{١} م_{٢١} (ش_{١} - ش_{٢}) = س_{٢} م_{١٢} (ش_{١} - ش_{٢})$ (٤−٥)

وهــكذا فعند تبادل طاقة الإشــعاع بــين سطحــــين رمـــــاديين تعــود المقاومـــة $\frac{١}{س_{١} م_{٢١}} = \frac{١}{س_{٢} م_{٢١}}$ إلى الشكل الهندسى ووضـــعية الـــسطحين والمقدارين $ش_{١}$، $ش_{٢}$

يمكننا الآن أن نكون دائرة كهربية مكافئة للسطحين الرماديين تــضم (مقاومـــة) كل سطح $\frac{١ - \epsilon}{س \cdot \epsilon}$ ، وكذلك المقاومة الناتجة عن الشكل الهندسى $\frac{١}{س_{١} م_{٢١}}$

$$ط_{ب١} \quad \frac{١-\epsilon_{١}}{س_{١}\epsilon_{١}} \quad \frac{١}{س_{٢} م_{١٢}} = \frac{١}{س_{١} م_{٢١}} \quad \frac{١-\epsilon_{٢}}{س_{٢}\epsilon_{٢}} \quad ط_{ب٢}$$

شكل (٤−٥)

الدائرة الكهربية المكافئة للتبادل الحرارى بين سطحين رماديين

ومعدل تبادل الإشعاع الصافى بين السطحين الرماديين = $ص_{٢١}$

حيث
$$ص_{٢١} = \frac{ط_{ب١} - ط_{ب٢}}{\left[\frac{١ - \epsilon_{١}}{\epsilon_{١} س_{١}} + \frac{١}{س_{١} م_{٢١}} + \frac{١ - \epsilon_{٢}}{\epsilon_{٢} س_{٢}}\right]}$$

$$= \frac{\sigma (د_{١}^{٤} - د_{٢}^{٤})}{\left[\frac{١ - \epsilon_{١}}{\epsilon_{١} س_{١}} + \left(\frac{١}{س_{١} م_{٢١}}\right) + \frac{١ - \epsilon_{٢}}{\epsilon_{٢} س_{٢}}\right]} \qquad (٤-٦)$$

فى هذه المعادلة قسم فرق الجهد الإجمالى على مجموع المقاومات.

وهناك بعض السمات الخاصة بخصوص وضعية السطوح هندسيا تتلخص فيما يلى:

١ – لسطحين متوازيين ذوى امتداد لا نهائى: $س_١ = س_٢ = س، م_{٢١} = ١$

ومن ثم فمن المعادلة (٤–٦) نحصل على $ص_{٢١} = \frac{س\ \sigma\ (د^٤_١ - د^٤_١)}{(\frac{١}{\epsilon_١}) + (\frac{١}{\epsilon_٢}) - ١}$

(٤–٧)

٢ – لأسطوانتين ذاتى محور مشترك $م_{٢١} = ١$ وتكون

$$ص_{٢١} = \frac{س_١\ \sigma\ (د^٤_١ - د^٤_١)}{(\frac{١}{\epsilon_١}) + (\frac{س_١}{س_٢})\ [(\frac{١}{\epsilon_٢}) - ١]} \quad (٤ - ٨)$$

ولسطح محدب صغير مساحته $س_١$ محاط إحاطة كاملة بسطح مقعر مساحته $س_٢$ حيث $س_١ \ll س_٢$، $م_{٢١} = ١$، تأخذ المعادلة (٤–٦) الصورة: $ص_{٢١} = س_١\ \epsilon_١\ \sigma$ $(د^٤_١ - د^٤_١)$ (٤–٩)

ويمكن تطبيق ذات المعادلة فى حالة مجمع للطاقة الشمسية ذى صفيحة مستوية يشع الطاقة للوسط المحيط به.

وفى سبيل تحويل معادلة انتقال الحرارة إلى معادلة خطية بدلالة الفروق فى درجات الحرارة مرفوعة إلى الأس الأول سنستخدم التحليل الرياضى:

$(د^٤_١ - د^٤_١) = (د^٢_١ - د^٢_٢)\ (د^٢_١ + د^٢_١)$.

$= (د_١ - د_٢)\ (د_١ + د_٢)\ (د^٢_١ + د^٢_٢)$

ومن ثم تأخذ المعادلة (٤–٦) الصورة: $Q_{٢١} = س١\ هـ_ش\ (د١ - د_٢)$

(٤–١٠)

حيث $هـ_ش$ هى معامل انتقال الحرارة بالإشعاع ويعطى بالمقدار

$$\text{هـ}_{ش} = \frac{\sigma\,(د_1 + د_2)\,(د_1^2 + د_2^2)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{م_{21}} + \frac{س_1}{س_2}\left(\frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2}\right)} \qquad (4-11)$$

ويمكن التعبير عن هـ ش فى الحالات الخاصة المشار إليها سابقًا كما يلى:

١- فى حالة سطحين متوازيين: $س_1 = س_2$، $م_{21} = 1$

$$\therefore \text{هـ}_{ش} = \frac{\sigma\,(د_1 + د_2)\,(د_1^2 + د_2^2)}{\left(\frac{1}{\epsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\epsilon_2}\right) - 1} \qquad (4-12)$$

٢ – فى حالة أسطوانتين طويلتين لهما محور مشترك: $م_{21} = 1$

$$\therefore \text{هـ}_{ش} = \frac{\sigma\,(د_1 + د_2)\,(د_1^2 + د_2^2)}{\left(\frac{1}{\epsilon_1}\right) + \left(\frac{س_1}{س_2}\right)\left[\left(\frac{1}{\epsilon_2}\right) - 1\right]} \qquad (4-13)$$

٣ – مع سطح محدب صغير محوط بأكملـه داخل سطح مقعر كبير ($س_1$ << $س_2$، $م_{21} = 1$)

$$\text{هـ}_{ش} = \epsilon_1\,\sigma\,(د_1 + د_2)\,(د_1^2 + د_2^2)$$

وإذا ما فقد سطح ما أو اكتسب حرارة عن طريق تيارات الحمل والإشـعاع فى ذات الوقت، فيعرف معامل انتقال الحرارة المشترك بـ $\text{هـ}_{حش} = \text{هـ}_{ح} + \text{هـ}_{ش}$ حيث $\text{هـ}_{ح}$ هى معامل انتقال الحرارة بتيارات الحمل.

مثال (١): سطح زجاجى مساحته ٢ x ٣ متر لمجمع ذى صفيحة مـستوية فى درجة حرارة ٧٥° م، معامل انبعاثه = ٠,٩، يفقد الحرارة بالحمل والإشعاع إلى الوسط المحيط به (فى درجة صفر° م)، ومعامل انتقال الحرارة بالحمل = ٤ وات / م٢، ك، احسب معدل فقدان الحرارة حيث σ = ٥,٦٧ x ١٠$^{-8}$(*).

(*) هكذا فى الأصل ولابد من إضافة وحدات المعامل σ هنا وهى وات /م٢. ٥ ك ٤

الحل: سنرمز للغطاء الزجاجي والوسط المحيط بالرقمين ١، ٢ على الترتيب، يمكن كتابة $\text{هـ}_{\text{ش}}$ في الصورة $\text{هـ}_{\text{ش}} = \sigma\, \epsilon_{١} (\text{د}_{١} + \text{د}_{٢}) (\text{د}_{١}^{٢} + \text{د}_{٢}^{٢})$

$$= (٥,٦٧ \times ١٠^{-٨}) (٠,٩) (٣٤٨ + ٢٧٣) (٣٤٨^{٢} + ٢٧٣^{٢})$$

$$= ٦,٢٠ \text{ وات /م}^{٢} \text{ °كلفن}$$

وبذلك فإن $\text{هـ}_{\text{ح ش}} = \text{هـ}_{\text{ح}} + \text{هـ}_{\text{ش}} = ٤,٠ + ٦,٢ = ١٠,٢$ وات / م٢. °كلفن

$$\text{ص}_{٢١} = \text{س}_{١}\, \text{هـ}_{\text{ح ش}} (\text{د}_{١} - \text{د}_{٢})$$

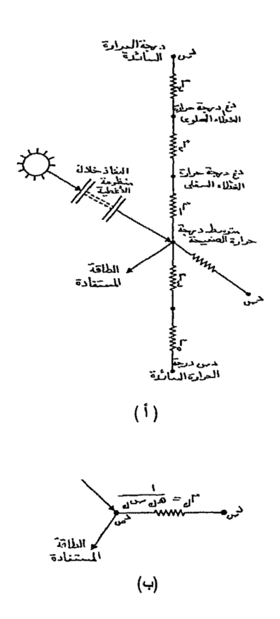
$$= (٢ \times ٣) (١٠,٢) (٣٤٨ - ٢٧٣)$$

$$= ٤٥٩٠ \text{ وات}$$

الفواقد من مجمع الطاقة:

عندما تسقط الطاقة الشمسية على سطح ممتص لمجمع، تنتقل معظم هذه الطاقة إلى الوسط الناقل الذى يحملها بعيدًا فى صورة مفيدة من الطاقة، على أية حال، فإن بعضًا من الطاقة يفقد إلى الوسط المحيط بأساليب مختلفة، وفيما يلى تحليل لهذه الفواقد التى تؤثر فى أداء مجمع الطاقة.

يوضح شكل (٤ – ٦) (الشبكة الحرارية) لغطاء مزدوج لمجمع شمسى مسطح، وستمثل فواقد الطاقة فى صورة (مقاومات حرارية) وبغرض تبسيط تحليلنا سنضع الافتراضات التالية:



شكل (٤ – ٦)

الشبكة الحرارية لمجمع شمسى مسطح ذى غطاء مزدوج

أ – المقاومات التفصيلية

ب – الشبكة المبسطة المناظرة

١) الإشعاع الشمسى الساقط على المجمع منتظم ومستمر.

٢) المجمع يعمل تحت ظروف ثابتة ومستقرة.

٣) درجات حرارة الصفيحة الممتصة والغطاء المزدوج الشفاف منتظمة.

٤) الفاقد من الطاقة فى الاتجاه إلى أعلى خلال الغطاء الشفاف أحادى البعد one dimensional.

٥) الفاقد من الحرارة فى الاتجاه إلى أسفل خلال العازل السفلى أحادى البعد.

٦) الفاقد من الحرارة فى الاتجاه العرضى عبر حافة العازل له بعد واحد حول محيط المجمع.

٧) تسود نفس درجة حرارة الوسط المحيط حول المجمع فى جميع الاتجاهات.

لحساب الاتزان الحرارى لمجمع طاقة شمسية، يوضح شكل (٤ – ٦ أ) المقاومات الحرارية المختلفة التفصيلية على حين يبين شكل (٤ – ٦ب) هذه المقاومات بعد توحيدها فى مقاومة واحدة، بحيث يمكننا التعبير عن الفواقد من الطاقة فى الصورة المبسطة:

$$\text{ح}_{\text{ف}} = \frac{\text{د}_{\text{ص}} - \text{د}_{\text{س}}}{\text{م}_{\text{ك}}} = \text{هـ}_{\text{ك}} \cdot \text{س}_{\text{ك}} \left(\text{د}_{\text{ص}} - \text{د}_{\text{س}}\right) \qquad (١٥-٤)$$

حيث $\text{هـ}_{\text{ك}}$ معامل فقد الحرارة الكلى المعتمد على مساحة المجمع الكلية $\text{س}_{\text{ك}}$

الفاقد من الحرارة خلال الغطاءين الشفافين:

فى حالة الاستقرار الحرارى، تتساوى الحرارة المنتقلة من الصفيحة الممتصة إلى الغطاء السفلى مع الحرارة المنتقلة من الغطاء السفلى إلى الغطاء العلوى، وتتساوى كذلك مع الطاقة المفقودة إلى الوسط المحيط من الغطاء العلوى.

والحرارة المنتقلة من الصفيحة الممتصة فى درجة $د_{ص}$ إلى الغطاء السفلى وهو فى درجة $د_{غ٢}$ تنتقل بتيارات الحمل والإشعاع بالموجات تحت الحمراء، وهى تعطى بالمعادلة:

الحرارة المفقودة من الغطاء العلوى = الحرارة المنتقلة من الصفيحة الممتصة إلى الغطاء السفلى

$$= س_{م}\ هـ_{ص-غ٢}\ (د_{ص} - د_{غ٢}) + \frac{س_{م}\ \delta\ (د^{٤}_{ص} - د^{٤}_{غ٢})}{\left(\frac{١}{\epsilon_{ص}}\right) + \left(\frac{١}{\epsilon_{غ٢}}\right) - ١} \qquad (٤-١٦)$$

حيث: $س_{م}$ = مساحة سطح المجمع.

$هـ_{ص-غ٢}$= معامل انتقال الحرارة بالحمل بين صفيحة الامتصاص والغطاء الزجاجى السفلى.

$\epsilon_{ص}$ = الانبعاثية تحت الحمراء لصفيحة الامتصاص.

$\epsilon_{غ٢}$ = الانبعاثية تحت الحمراء للغطاء السفلى

والحد الذى يعبر عن الإشعاع فى المعادلة (٤ – ١٦) يمكن تحويله لمقدار خطى بوضع التعريف التالى لمعامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين صفيحة الامتصاص والغطاء الزجاجى السفلى:

$$هـ_{ش(ص-غ٢)} = \frac{\sigma\ (د_{ص} + د_{غ٢})\ (د^{٢}_{ص} + د^{٢}_{غ٢})}{\left(\frac{١}{\epsilon_{ص}}\right) + \left(\frac{١}{\epsilon_{غ٢}}\right) - ١} \qquad (٤-١٧)$$

ومن ثم تتحول المعادلة (٤ – ١٦) إلى:

$$ح_{ف}\ \text{إلى أعلى} = س_{م}\ (هـ_{ص-غ٢} + هـ_{ش(ص-غ٢)})\ (د_{ص} - د_{غ٢})$$

$$= \frac{(د_{ص} + د_{غ٢})}{م_{١}} \qquad (٤-١٨)$$

$$\text{حيث}\ م_{١} = \frac{١}{س_{م}\ (هـ_{ص-غ٢} + هـ_{ش\ ص-غ٢})} \qquad (٤-١٩)$$

وبذات الأسلوب يعطى الفاقد الحرارى من الغطاء السفلى فى درجة $\text{د}_{\text{غ}٢}$ إلى الغطاء العلوى فى درجة $\text{د غ}_{١}$ بالمعادلة

$$\text{ح}_{\text{ف ع}} = \text{س}_{\text{م}} (\text{هـ}_{\text{غ}٢-\text{غ}١} + \text{هـ}_{\text{ش}\,(\text{غ}٢-\text{غ}١)}) (\text{د غ}_{٢} - \text{د غ}_{١})$$

$$= \frac{\text{د غ}_{٢} - \text{د غ}_{١}}{\text{م}_{٢}} \quad \text{حيث } \text{م}_{٢} = \frac{١}{\text{س}_{\text{م}} (\text{هـ}_{\text{غ}٢\text{غ}١} + \text{هـ}_{\text{ش غ}٢\text{غ}١})} \qquad (٢٠-٤)$$

حيث $\text{هـ}_{\text{ش، غ}٢\text{غ}١}$ = معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الغطاءين.

$\text{هـ}_{\text{غ}١\text{غ}٢}$ = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغطاءين.

$$\text{هـ}_{\text{ش، غ}٢\text{غ}١} = \frac{\sigma\,(\text{د غ}_{٢} + \text{د غ}_{١})\,(\text{د}^{٢}\text{غ}_{١} + \text{د}^{٢}\text{غ}_{٢})}{(\frac{١}{\epsilon_{\text{غ}٢}}) + (\frac{١}{\epsilon_{\text{غ}١}}) - ١} \qquad (٢١-٤)$$

حيث $\epsilon_{\text{غ}١}$، $\epsilon_{\text{غ}٢}$ = معامل الانبعاثية (للموجات تحت الحمراء) للغطاءين من السفلى والعلوى على الترتيب وتفقد الحرارة من الغطاء العلوى الشفاف بتيارات الحمل إلى الهواء المحيط وهو فى درجة حرارة $\text{د}_{\text{س}}$، وبالتبادل الإشعاعى مع السماء وهى فى درجة $\text{د}_{\text{م}}$، وللتسهيل تدمج الحرارة المنتقلة بالحمل والإشعاع إلى الهواء المحيط، ويمكننا كتابة

$$\text{ح}_{\text{ف ع}} = \text{س}_{\text{م}} (\text{هـ}_{\text{غ}١\text{هـ}} + \text{هـ}_{\text{ش، غ}١\text{هـ}}) (\text{دغ}_{١} - \text{د}_{\text{س}}) = \frac{\text{د غ}_{١} - \text{دم}}{\text{م}_{٢}} \qquad (٢٢-٤)$$

حيث $\text{هـ}_{\text{غ}١\text{ا}}$ = معامل انتقال الحرارة بالحمل من الغطاء العلوى الشفاف إلى الهواء المحيط

$\text{هـ}_{\text{ش، غ}١\text{ا}}$ = معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الغطاء العلوى والسماء

$$\text{هـ}_{\text{ش، غ}١\text{ا}} = \epsilon_{\text{غ}١}\,\sigma\,(\text{دغ}_{١} + \text{دس})\,(\text{د}^{٢}\text{غ}_{١} + \text{د}^{٢}\text{س})\,\frac{\text{د غ}_{١} - \text{دس}}{\text{د غ}_{١} - \text{دا}} \qquad (٢٣-٤)$$

حيث ϵ غ١ = معامل الانبعاثية (للموجات تحت الحمراء لسطح الغطاء العلوى)

$$م_٣ = \frac{١}{س_م (هـ_{غ١أ} + هـ_{ش، غ١أ})}$$

(٤-٢٤)

المقاومات (الحرارية) م١، م٢، م٣ موصلة على التوالى وتعطى محصلتها بالصيغة

$$م_ع = م_١ + م_٢ + م_٣ = \frac{١}{هـ_{أ} س_م} \quad (٤-٢٥)$$

$$\text{وبذلك فإن } ح_{ف ع} = \frac{د_{ص} - د_{أ}}{م_ع} = \text{II}_{ع} س_م (د_{ص} - د_{أ}) \quad (٤-٢٦)$$

فاقد الطاقة من سطح المجمع الأسفل:

تفقد هذه الطاقة عبر العازل السفلى، ثم تفقد بالحمل، وإشعاع الموجات تحت الحمراء إلى الوسط المحيط، وتعطى المقاومة الحرارية للسطح السفلى بالمعادلة

$$م_ق = م_٤ + م_٥ = \frac{ل_ع}{ص_ع س_ك} + \frac{١}{هـ_{ق أ} س_ك} \quad (٤-٢٧)$$

حيث أهملت هنا الطاقة المفقودة بالإشعاع، حيث إن السطح السفلى يكون فى درجة حرارة منخفضة وبالتالى يقل الفاقد بالإشعاع، وحيث:

$ل_ع$ = سمك الطبقة العازلة.

$ص_ع$ = معامل التوصيل الحرارى للمادة العازلة.

$هـ_{ق أ}$ = معامل انتقال الحرارة بالحمل من سطح المجمع السفلى إلى الوسط المحيط

ويمكننا التعبير عن فاقد الطاقة عبر السطح السفلى بالمعادلة

$$ح_{ق} = \frac{د_{ص} - د_{أ}}{م_{ق}} = هـ_{ق} س_{ك} (د_{ق} - د_{أ}) \qquad (٤-٢٨)$$

الفاقد فى الحرارة خلال الحواف:

يمكن تقدير الحرارة المفقودة خلال الحواف من المعادلة:

$$ح_{ف} = \frac{د_{ص} - د_{أ}}{م_{ف}} = هـَ_{ف} س_{ف} (د_{ص} - د_{أ}) \qquad (٤-٢٩)$$

حيث $س_{ف}$ = مساحة المحيط الخارجي للمجمع.

$هـَ_{ف}$ = ٠,٥ وات / م٢. كْ

ويمكن كتابة المعادلة (٤-٢٩) بدلالة مساحة سطح المجمع الكلية.

$$هـ_{ف} . س_{ك} = هـَ_{ف} . س_{ف}$$

$$\therefore ح_{ف} = \frac{د_{ص} - د_{أ}}{م_{ف}} = هـ_{ف} س_{ك} (د_{ص} - د_{أ}) \qquad (٤ - ٣٠)$$

وحيث إن المقاومات الحرارية الثلاث $م_{ع}$، $م_{ق}$، $م_{ف}$ تعتبر علـــى التـــوازى فإن:

$$م_{ك} \text{ للمجمع} = \left(\frac{١}{م_{ع}} + \frac{١}{م_{ق}} + \frac{١}{م_{ف}} \right)^{-١} \qquad (٤-٣١)$$

$$، هـ_{ك} \text{ للمجمع} = هـ_{ع} + هـ_{ق} + هـ_{ف} \qquad (٤-٣٢)$$

حيث $م_{ك}$ = المقاومة الكلية لفقدان الحرارة من المجمع.

$هـ_{ك}$ = معامل الفقد الكلى للحرارة على أساس مساحة سطح المجمع الكلية

هذه هى العوامل المطلوبة فى المعادلة (٤-١٥)، والمعادلات السابقة تعطى الحسابات لمعاملات فقد الحرارة فى حالة وجود منظومة ذات غطـــاءين، ويمكـــن

تعديلها فى حالة وجود غطاء مفرد أو عدة أغطية، وفى حل هذه المعادلات يلـزم اللجوء إلى التجربة والخطأ، وحساب معامل فقدان الحرارة الكلـى مـن الـسطح العلوى $هـ_ع$ مجهد ويستغرق الكثير من الوقت، ومن ثم فإن التقدير المباشر لقيمة $هـ_ع$ فى حيز الإمكان بتطبيق المعادلة التجريبية الآتية، وهى ذات دقة كافية فيمـا يتعلق بأغراض التصميم:

$$\text{هـ}_{\text{ع}} = \left[\frac{\text{ن}}{\frac{\text{أ}}{\text{د}_{\text{ص}}} \left(\frac{\text{د}_{\text{ص}} - \text{د}_{\text{أ}}}{\text{ن} + \text{ب}} \right)^{٠,٣٣}} + \frac{\text{أ}}{\text{هـ}_{\text{ر}}} \right]^{-١} + \frac{\sigma \, (\text{د}_{\text{ص}} + \text{د}_{\text{أ}}) \, (\text{د}^{٢}_{\text{ص}} + \text{د}^{٢}_{\text{أ}})}{[\epsilon_{\text{ص}} + ٠,٠٥ \, \text{ن} \, (١ - \epsilon_{\text{ص}})]^{-١} + \left[\frac{٢\text{ن} + \text{ب} - ١}{\epsilon_{\text{ز}}} \right] - \text{ن}} \qquad (٤-٣٣)$$

حيث:

$\text{أ} = ٢٥٠ \, [\, ١ - ٠,٠٠٤٤ \, (\text{ي} - ٩٠) \,]$

$\text{ب} = (١ - ٠,٠٤ \, \text{هـ}_{\text{ر}} + ٠,٠٠٠٥ \, \text{هـ}^{٢}_{\text{ر}}) \, (١ + ٠,٠٩١ \, \text{ن})$

ن= عدد الأغطية الزجاجية.

$د_أ$= درجة الحرارة السائدة. ْك.

$\epsilon_ز$= معامل انبعاثية الزجاج.

σ= ثابت ستيفان بولتزمان = $٥,٦٧ \times ١٠^{-٨}$ وات / م٢. ْك٤

$هـ_ر$= معامل انتقال الحرارة الخاص بالرياح: وات / م٢. ْك.

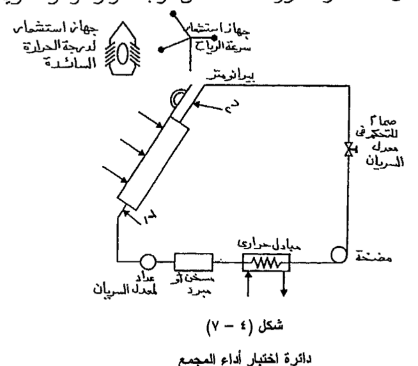
$د_ص$= متوسط درجة حرارة صفيحة امتصاص المجمع ْك.

$\epsilon_ص$= معامل انبعاثية صفيحة الامتصاص.

ى = زاوية ميل سطح المجمع.

اختبار أداء المجمع:

وضعت الجمعية الأمريكية لمهندسى التسخين والتبريد وتكييف الهواء ASHRAE خطوات عمل لاختبار أداء يطبق على مجمعات التسخين بالسوائل أو بالهواء، ويبين الشكل (٤ – ٧) رسمًا تخطيطيًا لأسلوب الاختبار، إذ يستعمل بيرانومتر فى قياس الإشعاع الشمسى على سطح المجمع، وتحتوى الدائرة التى يسرى خلالها المائع على صمام للتحكم فى مقدار تدفق المائع، ومضخة لدفعه، ومبادل حرارى لامتصاص الحرارة المستفادة من الدائرة، ومعدة تسخين أو تبريد للتحكم فى درجة حرارة الدخول للمجمع، وجهاز لقياس مقدار معدل تدفق المائع، كما توجد وسائل استشعار لقياس درجات الحرارة عند مدخل المجمع ومخرجه، كما نحتاج لأجهزة قياس الضغط ومقدار الانخفاض فى الضغط عبر المجمع، وهناك كذلك وسائل لاستشعار الظروف السائدة من درجة حرارة وسرعة رياح.



شكل (٤ – ٧)

دائرة اختبار أداء المجمع

ويتعين أن يجرى الاختبار تحت ظروف مستقرة، من حيث ثبات الطاقة الإشعاعية المسلطة على سطح المجمع، وثبات سريان المائع عند درجة حرارة ثابتة عند مدخل المجمع، وكذلك يتعين أن تكون سرعة الرياح ودرجة الحرارة السائدة ودرجة حرارة خروج المائع كلها ثابتة، بما يتيح ثباتًا فى مردود الطاقة المكتسبة.

والطاقة المفيدة المكتسبة تعطيها المعادلة

ص = كَ ن$_{ض}$ (د$_{٢}$ – د$_{١}$)　　　(٤ – ٣٤)

حيث كَ = معدل سريان المائع الحامل للحرارة.

ن $_{ض}$ = الحرارة النوعية للمائع الحامل للحرارة

د $_{٢}$ = درجة حرارة المائع لدى المخرج

د $_{١}$ = درجة حرارة المائع لدى المدخل

وتعطى الكفاءة اللحظية للمجمع بالمعادلة

$$\eta_{م} = \frac{Q/ س_{م}}{هـ_{ج}} = \frac{(كَ/س_{م})\ ن_{ض}\ (د_{٢} - د_{١})}{هـ_{ج}} \qquad (٤-٣٥)$$

حيث س $_{م}$ = مساحة سطح المجمع، هـ $_{ج}$ الإشعاع الإجمالى الساقط (الحزمى والانتشارى).

وعادة ما تجرى اختبارات أداء المجمع فى أيام مشرقة ذات معدل إشعاع عال. ومع تثبيت المجمع فى وضع متعامد تقريبًا مع أشعة الشمس نعرف أن أغلب الطاقة المتلقاة هى طاقة حزمية عمودية، ونتيجة لذلك فإن حاصل ضرب معاملى النفاذية والامتصاص عند اختبار المجمع يجب أن يناظرا الإشعاع الحزمى عند سقوطه عموديًا، فإذا عبرنا عن حاصل ضرب معاملى النفاذية (ح) والامتصاص

(أ) عند السقوط العمودى بالحد (ح أ) ع فيمكننا التعبير عن الطاقة المستفادة بالمعادلة

$$ح_{ف} = س_{م} م [هـ_{ج} (ح أ)_{ع} - ف (د_{١} - د_{أ})] \qquad (٤- ٣٦)$$

حيث ف = معامل فقدان الطاقة الكلى، م = معامل نزح الحرارة من المجمع.

والمعامل م هو نسبة معدل سريان الحرارة الفعلى إلى المائع الحامل، إلى معدل سريان الحرارة بافتراض أن مجمل صفيحة الامتصاص تعمل عند درجة حرارة تساوى درجة حرارة المائع لدى دخوله.

$$م = \frac{كَ . ن_{ض} (د_{٢} - د_{١})}{س_{م} [هـ_{أ} - ف (د_{١} - د_{أ})]} \qquad (٤-٣٧)$$

حيث هـ أ هى الطاقة الحرارية التى يمتصها المجمع.

وبقسمة طرفى المعادلة (٤ – ٣٦) على س م هـ ج نحصل على هذه الصيغة المعبرة عن الكفاءة.

$$\eta_{م} = \frac{ح_{ف}}{س_{م} هـ_{ج}} = م (ح أ)_{ع} - م ف \frac{د_{١} - د_{٢}}{هـ_{ج}} \qquad (٤-٣٨).$$

فلمجمع معين يعمل تحت ظروف ثابتة لكل من الإشعاع الساقط والمائع حامل الحرارة تكون المعاملات م، (ح أ)ع، ف ثابتة تقريبًا، بصرف النظر عن ظروف الشمس ودرجة الحرارة، وإذا وقعنا رسمًا بيانيًا للعلاقة ما بين كفاءة المجمع والمقدار $\frac{د_{١} - د_{٢}}{هـ_{ج}}$ فإننا نحصل على خط مستقيم يعطى ميله قيمة سالبة للمقدار م (ف) عمودية، والجزء المقطوع من محوره الرأسى يعطى القيمة م. (ح أ) ع

المجمعات بالتركيز:

فى حالة تطبيقات الطاقة الشمسية ذات درجات الحرارة العالية (مثل توليد الطاقة الحرارية) ينبغى أن تركز الطاقة الشمسية بوسيلة ضوئية قبل تحويلها لحرارة، ومن ثم فإن زيادة التأثير الحرارى لجهاز التركيز يمكن تحقيقها بأن ينعكس أن ينكسر الإشعاع الشمسى بواسطة مرايا أو عدسات، ويركز الضوء المنعكس أو المنكسر فى منطقة البؤرة، مما يزيد من فيض الطاقة الذى يتلقاه الحمل المستهدف.

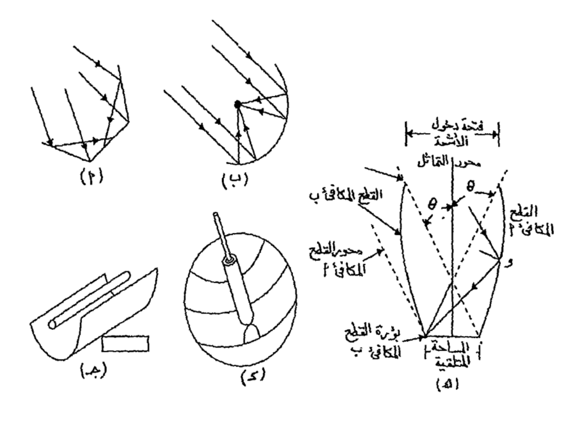
والنسبة ما بين المساحة التى تنفذ الأشعة خلالها ومساحة الجزء المتلقى تعرف بمعامل تركيز المساحة أو للتبسيط معامل التركيز (ك)، ويمكن التعبير عنه بالمعادلة.

$$ك = \frac{س_{ا}}{س_{ر}}$$

حيث $س_{ا}$ هى مساحة المجمع المعرضة للإشعاع الشمسى، $س_{ر}$ هى المساحة المستهدفة التى تتلقاه.

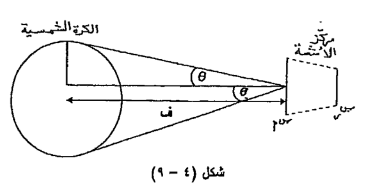
ويوضح شكل (٤-٨) بعض أنواع المركزات الدارجة، فالشكل (أ) يبين متلقيا (جهاز تلقى) مسطحًا ذا مرايا مستوية تقوم بعكس الأشعة، ومعامل تركيز هذا النوع منخفض للغاية، ويوضح الشكل (ب) جهاز تركيز على شكل قطع مكافئ، والمركزات من هذا النوع تكون إما ذات بعد واحد (خطية) أو ذات بعدين مثل المركّز الذى على شكل قطع مكافئ أسطوانى **CPC** (شكل جـ) أو ذات ثلاثة أبعاد (مركز على شكل قطع مكافئ مجسم (شكل د)، وتتمتع هذه المركزات بقيم عالية جدًا لمعامل التركيز، وشكل (هـ) به مركز ذو قطع مكافئ مجسم مركب،

وهو عبارة عن مركز خطى ذى بعدين يتكون من قطعتين مكافئتين منفصلين يميل سطحاهما بزاوية ±θ على محور المجمع الضوئى، وتعرف الزاوية ٢ θ بزاوية التلقى للقطع المكافئ المجسم المركب، وتعرف زاوية التلقى بأنها الزاوية التى يمكن لمصدر ضوئى أن يتحرك خلالها مع استمرار تجمعه على عضو التلقى.



شكل (٤ – ٨)

وبشكل (٤ – ٩) رسم تخطيطى لجهاز تركيز، حيث س ع هى المساحة المعرضة، س ر هى مساحة المتلقى وذلك لمركز دائرى موضوع على مسافة ف من مركز الشمس التى تمثل كرة إشعاعية نصف قطرها نق، والزاوية θ هى نصف الزاوية التى تحصرها الشمس وهى نصف زاوية التلقى التى تناظر أقصى درجة تركيز.



شكل (٤ – ٩)

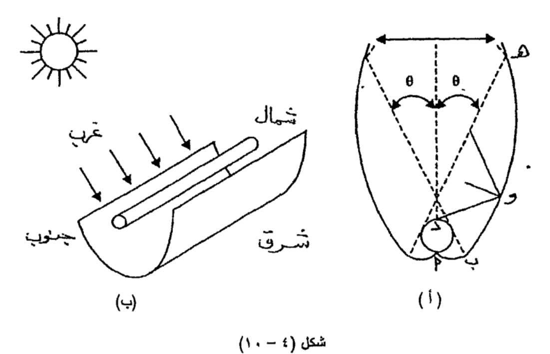
رسم تخطيطى لجهاز تركيز وعلاقته البعدية بالنسبة للشمس

ومعلوم أن نصف زاوية التلقى(*) θ = ١٦َ أو ٠,٢٧ ْ وبالتالى فإن أقصى تركيز لجهاز نموذجى ذى ثلاثة أبعاد = ٤٥٠٠٠، وأقصى تركيز لجهاز ثنائى الأبعاد = ٢١٢٠ وللوصول إلى هذه المستويات من التركيز، لابد وأن يتعقب الجهاز الشمس فى تحركها بشكل مستمر، والمركز الأسطوانى المركب الذى له شكل القطع المكافئ (شكل ٤ – ٨هـ) جهاز عالى الكفاءة، وبترشيد تعقبه للشمس يمكن لمعامل تركيز هذا الجهاز أن يصل إلى $\frac{١}{جا\ \theta}$ لنصف زاوية تلقى θ، وربما تنخفض فعالية الجهاز نتيجة عدم الانعكاس التام، علاوة على الخطأ فى رصد أو تعقب الشمس، وعند تشكيل الأسطح العاكسة، يلزم أن ينصف المستقيم العمودى على العاكس عند أية نقطة (و) عليه الزاوية بين الخط و ب، والشعاع الساقط على النقطة وبزاوية ميل = θ على محور المجمع.

ويمكن للمتلقى ذى البعدين أن يتخذ العديد من الأشكال المتنوعة، فقد يتخذ شكلا أنبوبيًا (شكل ٤ – ١٠ أ) وفى هذا المركز المركب ذى القطع المكافئ يكون الجزء السفلى من العاكس (أ ب) دائريًا، فى حين يتخذ الجزء العلوى (ب هـ) شكل قطع مكافئ، وفى هذه الحالة يقتضى الأمر للجزء العلوى أن ينصف المستقيم العمودى على العاكس عند أية نقطة، والزاوية بين المماس و د الذى يماس المتلقى والشعاع الساقط عند و بزاوية مقدارها θ بالنسبة لخط محور المجمع.

(*) يرجى الرجوع إلى شكل (٣-٤) بالباب الثالث (المترجم)

ويمكن أن يوجه المركز الأسطوانى ثنائى الأبعاد بحيث ينطبق محوره الطولى مع اتجاه الشمال – الجنوب أو الشرق – الغرب، ويميل السطح المعرض نحو اتجاه خط الاستواء، ولدى توجيهه فى اتجاه الشمال – الجنوب (شكل ٤ – ١٠ ب) يتعين أن يتعقب المجمع الشمس بصفة مستمرة بإدارته حول محوره بحيث يواجه الشمس، ولا يلزم فى هذه الحالة تعديل الميل طبقا للموسم (الوقت فى السنة) بالضرورة، حيث إن زاوية التلقى على امتداد محوره الطولى بالغة الكبر، وحين يوجه المركز بحيث ينطبق محوره الطولى على اتجاه الشرق – الغرب، ومع تعديل طفيف طبقا للموسم لزاوية الميل، يصبح المركز قادرًا على اقتناص أشعة الشمس بفعالية عبر زاوية التلقى الكبيرة على امتداد محوره الطولى، وبالمثل يمكن أن تكون المركزات الخطية ذات البعد الواحد والتى تستعمل فقط للدرجات المعتدلة من التركيز، مثبتة بصفة دائمة فى اتجاه الشرق – الغرب.



شكل (٤ – ١٠)

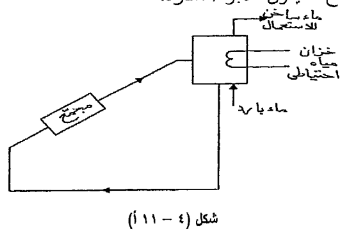
(أ) مركز مركب بشكل قطع مكافئ ذو عضو امتصاص أنبوبى.

(ب) مركز أسطوانى بشكل قطع مكافئ موجه ناحية الشمال – الجنوب.

مسخنات المياه الشمسية:

إن أكثر الاستعمالات جدوى وأكبرها من حيث التوسع المستقبلى للطاقة الشمسية توجد فى مجال تسخين المياه، ولا تتطلب عملية التسخين هذه سوى درجة حرارة معقولة، ومن ثم فيمكن إنجازها بسهولة باستعمال مجمع قليل التكاليف من النوع ذى الصفائح المستوية.

وفى شكل (٤ – ١١ أ) مسخن مياه شمسى بسيط يعمل بتيارات الحمل الطبيعية، وتتكون منظومة هذا المسخن من مجمع ذى صفائح مستوية لتسخين المياه (عادة ما يكون ذا جدار مفرد مزجج)، وصهريج تخزين (بحيث يكون المجمع على منسوب منخفض عن منسوب صهريج التخزين)، ويعتمد سريان الماء فى الدائرة بالكامل على فارق الكثافة ما بين المياه الساخنة داخل المجمع بفعل الشمس، والماء الأبرد عند قاع صهريج التخزين (نتيجة التدرج فى درجات الحرارة)، وهذا النوع من مسخنات المياه الشمسية المعتمد على الانتقال الحرارى السيفونى(*) أصلح ما يكون للأجواء الحارة.



شكل (٤ – ١١ أ)

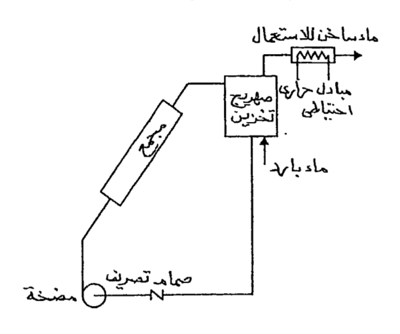
مسخن مياه شمسى بتيارات الحمل الطبيعية

(*) الانتقال الحرارى السيفونى **thermosiphon** يعنى تبادلاً حراريًا يعتمد على تيارات الحمل فى حركة المائع دونما حاجة إلى قوة رفع ميكانيكية (المترجم)

ولدى تعذر وضع صهريج التخزين على منسوب أعلى من المجمع، تستعمل وسيلة لدفع الماء فى الدائرة (شكل ٤ – ١١ ب).

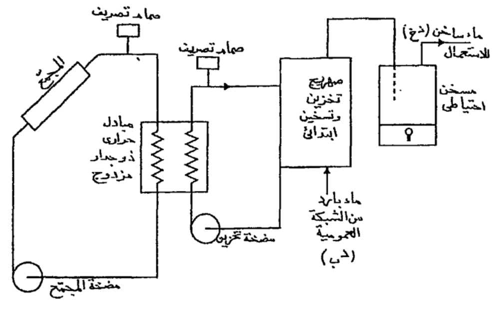
ويمكن مع هذا الترتيب وضع المجمع فوق سطح بناء ووضع صهريج التخزين فى الدور الأرضى، ويعمل محرك المضخة بموجب جهاز استشعار حرارى عندما يتخطى فرق درجات الحرارة ما بين مخرج الماء من المجمع وماء صهريج التخزين ست درجات مئوية، ولدى استعمال هذه المنظومة فى أجواء باردة لابد من توفير وسيلة لتصريف ماء المجمع.

وللحيولة دون غليان المياه فى المجمع عند تعرضه لشمس حامية مع ضعف سريان الماء فى دائرته، يلزم تركيب صمام تصريف أو تنفيث.



شكل (٤ – ١١ ب)

مسخن مياه شمسى بتيارات الحمل القسرية



شكل (٤ – ١١ جـ)

مسخن مياه شمسى بمحلول مضاد للتجمد

يبين شكل (٤ – ١١ جـ) مسخنًا شمسيًا للمياه بمحلول مقاوم للتجمد، وفى هذه المنظومة يستعمل محلول من جليكول الإيثيلين **ethylene glycol** فى الماء فى دائرة المجمع مع مبادل حرارى ذى حائط مزدوج، كوسيلة للحماية ضد التجمد، ولابد للمبادل الحرارى من جدار مزدوج من معدنين يحجزان بينهما المحلول المقاوم للتمدد ذا الأثر السام ويعزلانه عن مصدر المياه المستخدمة منزليًا، ويقتضى الأمر مضختين، إحداهما لدفع مائع دائرة المجمع (غير المضغوط) والأخرى لدفع مياه الاستخدام المنزلى (تحت ضغط). ولضمان إمداد وفير مؤكد من المياه، تلزم صورة من صور الطاقة المساعدة مثل الكهرباء أو الوقود الأحفورى، لدعم مصدر الطاقة الشمسى. ومن وجهة النظر الاقتصادية يوصى – عمليا – بأن تؤسس التصميمات على متوسط الإشعاع اليومى فى أحد شهور الصيف، بحيث يستخدم إمداد الطوارئ هذا لمواجهة ظروف شح المياه الساخنة فى الأيام الغائمة أو فى الشتاء. ونستطيع حساب حمل تسخين المياه المنزلية الشهرى (ح) من الصيغة.

$$ح = ن_{ي}\, ن_{ع}\, ح_{ف}\, أ\, ن_{ص}\, (د_{خ} - د_{ب})$$

حيث $ن_{ي}$ = عدد الأيام فى الشهر

$ن_{ع}$ = عدد الأفراد ساكنى المنزل.

$ح_{ف}$ = حجم المياه الساخنة اللازمة للفرد الواحد.

أ = كثافة الماء (١ كجم / لتر)

$ن_{ص}$ = الحرارة النوعية للماء (= ٤١٩٠ جول / كجم °م)

$د_{خ}$ = درجة حرارة الماء الساخن (حوالى ٦٠ °م)

$د_{ب}$ = درجة حرارة الماء البارد.

ويمكن صياغة الحمل الحرارى لتسخين الماء لمبنى سكن لمدة شهر فى الصورة

$$ح = ح_{ش}\, أ\, ن_{ص}\, (د_{خ} - د_{ب})$$

حيث $ح_{ش}$ = حجم الماء الساخن اللازم لمدة شهر.

مشكلة التآكل الكيميائى:

التآكل الكيميائى مشكلة حقيقية لا تختص فقط بالمجمعات، ولكن بكل منظومات التسخين التى تعمل بمائع، وله أهمية خاصة فى المجمعات ذات صفائح الامتصاص الألومنيومية، والمنظومات ذات المواسير من الألومنيوم، ويهمنا الأشكال التالية من التآكل الكيميائى.

١) **التأكسد:** ويمكن منع التأكسد بإزالة الأكسجين المذاب فى السائل الناقل للحرارة وبمنع تعريض هذا السائل للجو، ويمكن تحقيق ذلك بتطبيق منظومة مغلقة.

٢) **التآكل عن طريق التبادل الأيونى:** يمكن أن تتسبب أيونات المعادن الثقيلة فى مانع المجمع، فى حدوث تنقير كيميائى **Pitting**، ويستفحل خطر التنقير بوجود أيونات الكلور فى المحلول المائى، والتى قد يرجع وجودها إلى المياه الآتية من المصدر أو إلى مساعدات الصهر المستخدمة فى لحام المواسير، وقد تنجم أيونات المعادن الثقيلة من التآكل فى أجزاء أخرى من المنظومة (وقد تحتوى عليها مياه المصدر الرئيسى)، وتساعد إضافة مواد مانعة للتآكل إلى المائع الناقل للحرارة على كبح هذا التبادل الأيونى، ومن أهم المواد المانعة للتآكل الكيميائى:

أ – ميتاسيليكات الصوديوم (وهو مانع تآكل عام الاستخدام مع النحاس الأحمر والحديد والبيريليوم).

ب – أورثوفوسفات الصوديوم (ويستعمل لحماية الحديد والألومنيوم).

جـ – نيترات الصوديوم (ويستعمل لحماية الحديد والألومنيوم ومواد اللحام).

د – كرومات الصوديوم والبوتاسيوم وما إليها (وهى موانع تآكل عامة للاستخدام مع الألومنيوم والحديد والنحاس الأحمر).

٣) التآكل عن طريق التأثير الجلفانى **Galvanic action**، حينما يتلامس معدنان مختلفان فى محلول كهربى، فعند اقتران النحاس الأحمر والألومنيوم، يعمل النحاس الأحمر بمثابة المهبط ويتسارع تآكل الألومنيوم.

٤) التآكل عن طريق التشقق أو التصدع، وفى هذه الحالة يتسارع تآكل المعدن محدثًا ثغرة أو شقًا، وقد يرجع السبب فيه إلى سوء التركيب أو زيادة مادة مانع التسرب أو ترسبات من الصدأ أو انسدادات أو اضطراب فى السريان.

وتتلخص آلية هذا التآكل التصدعى فى أن الأكسجين الذى سرعان ما ينفد داخل الخلية، يكون مصعدا **anode** وإذا كان هناك وفرة فى الأكسجين خارج الصدع فيمكن أن تقوم المساحة خارج الصدع مقام المهبط، وينشط الحيز الصغير داخل الشق مما يفضى إلى تآكل كيميائى سريع، ويمكن الحد من هذا النوع من التآكل بالتصميم السليم والتركيب الصحيح للمعدات لإزالة أية مواد متخلفة قد تؤدى إلى انسداد المجرى.

المبادلات الحرارية:

فى المنظومات غير المباشرة يلزم مبادل حرارى فى صهريج التخزين، يعمل على فصل الماء المنساب خلال المجمع عن الماء الذى يسرى إلى الصنابير داخل المنزل، وبطبيعة الحال لابد وأن يسمح المبادل للحرارة التى يمتصها الماء فى المجمع بالسريان إلى الماء المختزن فى الصهريج.

وما من مبادل حرارى بمقدوره أن ينقل كل الحرارة الممتصة فى الدائرة الابتدائية إلى الدائرة الثانوية، وعادة ما يتم تبادل من ٦٠ إلى ٩٠% منها، وعلى ذلك فإن قسما لا يستهان به من الطاقة الشمسية التى يتم تجميعها لا يصل على الإطلاق إلى صهريج التخزين من جراء انخفاض كفاءة المبادل الحرارى، ومن ثم يتعين النظر بعين الاعتبار إلى العوامل التى تؤثر على أدائه، وتعتمد كمية الحرارة المنتقلة عبر المبادل الحرارى على أربعة عوامل:

أ) فروق درجات الحرارة بين الماء الساخن المنساب لداخل المبادل والماء اللازم تسخينه بصهريج التخزين.

ب) معامل التوصيل الحرارى لمادة المبادل الحرارى، وللمعادن عمومًا وللنحاس بصفة خاصة توصيلية حرارية عالية.

جـ) مساحة سطح المبادل، فكلما زادت المساحة المشتركة ما بين الماء الساخن والبارد زادت كمية الحرارة المنتقلة بينهما.

د) معدل سريان المياه، فكلما زاد معدل مرور المياه بالمبادل زادت كمية الحرارة المتبادلة خلاله.

موضع تركيب المبادل الحرارى:

ينبغى أن يركب المبادل الحرارى عند قاع صهريج التخزين الشمسى حيث يستقر الماء الأكثر برودة، وحيث يكون أقصى فرق فى درجات الحرارة، ومن ثم يعمل المبادل بأعلى قدر من الفاعلية.

مادة تصنيع المبادل الحرارى ومساحة سطحه:

النحاس الأحمر هو أفضل المواد لتصنيع المبادل الحرارى، وفى منظومة تناسب الاستعمال المنزلى تبلغ مساحة سطح المبادل الحرارى نحو ٠,٢ – ٠,٣ متر مربع لكل متر مربع من مساحة سطح المجمع، ولكل متر مربع من سطح المجمع تلزم ٤ أمتار طولية من المواسير ذات قطر ١٥ مم، ٣ أمتار طولية من المواسير ذات قطر ٢٢ مم لتصنيع المبادل.

الشكل الهندسى للمبادل الحرارى:

يؤثر الشكل الهندسى للمبادل الحرارى على معدل سريان الماء الذى يمر خلاله، فالأكواع الحادة تزيد من معاوقة السريان وتبطئ منه، فيقل بالتالى معدل التبادل الحرارى، وعلى ذلك فيفضل استعمال الانحناءات السلسة المتدرجة.

ولهذا الاعتبار أهمية خاصة فى النظم الحرارية السيفونية، والتى يكون فيها السريان بطبيعته أكثر بطئًا، وفى المنظومات المحتوية على مضخات، حيث يسهل التغلب على معوقات السريان يفيد كثيرًا استخدام الأكواع فى المبادلات الحرارية، إذ أنها تزيد من إحداث سريان مضطرب مما يرفع من التبادل الحرارى، وهناك حل أيسر يتلخص فى استعمال مواسير ذات أقطار داخلية صغيرة للغاية، يسهل تشكيلها إلى الصورة المطلوبة من أمتار من ماسورة قطرها ١٠ مم لكل متر مربع من سطح المجمع.

تدفئة المنازل بالطاقة الشمسية:

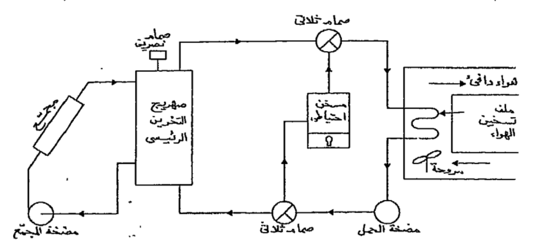
هناك فئتان من منظومات تدفئة الأماكن شمسيًا: التدفئة الإيجابية والتدفئة السلبية، ففى المنظومات الإيجابية يجمع الإشعاع الشمسى بواسطة مجمع ذى تصميم خاص، وتخزن الطاقة الحرارية فى جهاز تخزين خاص، وعادة ما يجرى نقل المائع ناقل الحرارة بوسيلة ميكانيكية، أما فى المنظومة السلبية فيسمح للإشعاع الشمسى بدخول المبنى رأسًا من خلال فتحات شفافة كبيرة، أى تقوم هياكل وأجزاء البناء ذاتها بتجميع الطاقة الشمسية وتخزينها.

منظومات التدفئة الإيجابية للمنازل بالطاقة الشمسية:

يوضح شكل (٤ – ١٢) رسمًا تخطيطيًا لمنظومة تدفئة منزلية نمطية بالطاقة الشمسية، إذ تستخدم مجمعات للطاقة الشمسية ذات ألواح مسطحة ومائع سائل لامتصاص الطاقة الشمسية وتحويلها لحرارة إلى الوسط الذى ينقلها، ويستعمل الماء سواء كوسيلة لنقل الحرارة أو لتخزينها، ويضخ الماء الساخن إلى

صهريج التخزين تمهيدا لسريانه إلى الحيز المطلوب تدفئته، ويتكامل مع هذه المنظومة الشمسية مسخن تقليدى يعمل بالوقود الأحفورى كمصدر احتياطى للطاقة عندما يقصر الجهاز الشمسى فى تلبية احتياجات المبنى بسبب الطقس الغائم أو البارد، ويزود المبنى بالحرارة من خلال الهواء الدافئ الذى يدفعه ضاغط هواء مركزى ومبادل حرارى ما بين الماء والهواء.

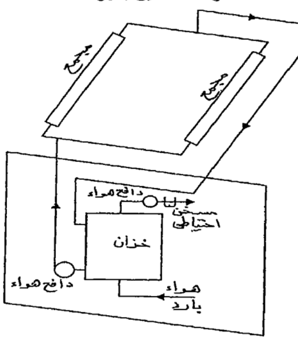
ويقوم التحكم فى منظومة التدفئة هذه على إشارتين لدرجة الحرارة، تؤشر إحداهما فرق درجات الحرارة بين المجمع وصهريج التخزين وتؤشر الأخرى درجة حرارة الغرفة، وحينما يتخطى فرق درجتى الحرارة ما بين لوحة المجمع الماصة وقاع صهريج التخزين ست درجات مئوية، تشغل مضخة المجمع وتستمر فى العمل حتى يقارب فرق درجات الحرارة الصفر وعندها تتوقف المضخة، وعند احتياج الغرفة للتدفئة، تشغل مضخة الحمل فتسحب الماء المسخن من صهريج التخزين الرئيسى لتلبية هذه الحاجة، وإذا لم تكف الطاقة فى صهريج التخزين حجم الحمل المطلوب، فإن مرحلة أعلى من جهاز ضبط درجة الحرارة تحفز منظومة التحكم الآلى على تشغيل مسخن الطوارئ ليغطى الفارق الحرارى اللازم.



شكل (٤ – ١٢)

رسم تخطيطى لنظام تدفئة شمسى ذى وسط ناقل سائل

ويبين شكل (٤ – ١٣) نظام تدفئة شمسيًا بالهواء، وفى هذه الحالــة يــدفع الهواء المسخن من المجمع بضاغط هواء إلى الحيز المطلوب تدفئتــه، وتــستخدم طبقة من الحصى بالأرضية فى هذه المنظومة كوسيلة تخــزين للطاقــة، ويتــسم استخدام طبقات من الحصى بميزة وجود تراكب تدرجى قاطع بين درجات الحرارة عبر طبقات الحصى بما يضمن درجة حرارة دخــول منخفــضة إلـــى المجمـــع، وبالتبعية تحسين كفاءة أداء منظومة التسخين بالهواء.



شكل (٤ – ١٣)

رسم تخطيطى لنظام تدفئة مبنى باستعمال مسخن شمسى للهواء

وهناك مزايا نسبية لكل من منظ.ـت التدفئة الشمسية بالمـــاء أو بـــالهواء، فالمنظومات المائية دائمًا ما تواكبها مشاكل ومخاطر مثل احتمال تجمد المجمع، أو غليان الماء فيه، وتأثيرات الماء فى التآكل الكيميائى والتسرب العارض.

والحرارة النوعية للماء تزيد كثيرًا عن تلك الخاصة بالهواء وشبكة الأنابيب ومعدات التخزين مع المنظومة المائية أقل حجمًا من نظيرتها مع منظومات الهواء، وللحصول على نفس السعة التخزينية يلزم لمنظومة التدفئة بالهواء ثلاثة أمثال الحجم اللازم للتدفئة بالماء.

منظومات التدفئة السلبية:

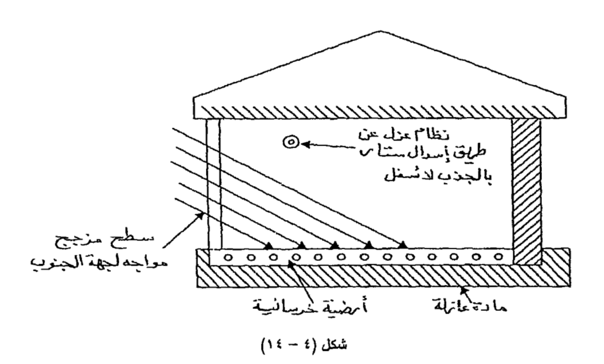
يتعين أن يمثل تصميم منظومة التدفئة السلبية جزءًا متكاملاً من عملية التخطيط المعمارى، بما فى ذلك مسائل اختيار الموقع واتجاه المبانى ومواصفات المواد، وهناك ثلاثة أنواع نمطية ومتمايزة من تصميمات التدفئة السلبية هى:

التأثير المباشر والتأثير غير المباشر وتأثير الدفيئة (الاحتباس الحرارى).

فى منظومة التدفئة السلبية من النوع ذى التأثير المباشر يسمح لضوء الشمس أن ينفذ رأسًا عبر نوافذ واسعة ذات زجاج مزدوج ومواجهة لجهة الجنوب إلى الحيز المطلوب، حيث يصطدم بالمبنى وبهيكله الداخلى ذى الكتلة الضخمة ويتحول إلى طاقة حرارية، وتساعد الكتل الهيكلية على تعديل التطرف فى درجات الحرارة داخل المبنى بتخزين فائض الطاقة الحرارية خلال النهار وإطلاقها خلال الليل، ولمنع تسرب الحرارة من الأجسام الحرارية بالداخل إلى الوسط الخارجى يحبذ عزل المبنى حراريًا من الخارج، ويلزم كذلك عزل قاع بلاطات الأرضية لعزل داخل المبنى عن الأرض، وبشكل (٤ – ١٤) توضيح لمنظومة تدفئة سلبية بسيطة من نوع المردود المباشر ذات أرضية خرسانية معزولة وستائر عازلة تسدل بالجذب إلى أسفل.

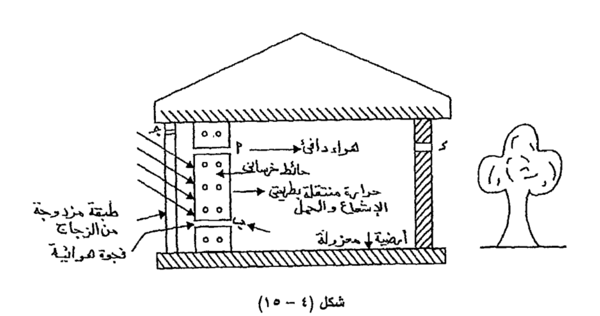
وأطرف تصميمات التدفئة السلبية غير المباشرة جاذبية، هى الجدار المخزن الممتص، أو حائط ترومب(*) **Trombe wall**، وهو جدار سميك من الخرسانة مواجه للجنوب ومقام رأسًا خلف لوح زجاجى مفرد أو مزدوج مع وجود حيز من الهواء بين الزجاج، والسطح الخارجى للجدار المطلى بطلاء أسود (شكل ٤ – ١٥).

(*) نسبة إلى مخترعه المهندس الفرنسى ترومب (عام ١٨٨١) (المترجم)



شكل (٤ – ١٤)

منظومة تدفئة سلبية من طراز المردود المباشر



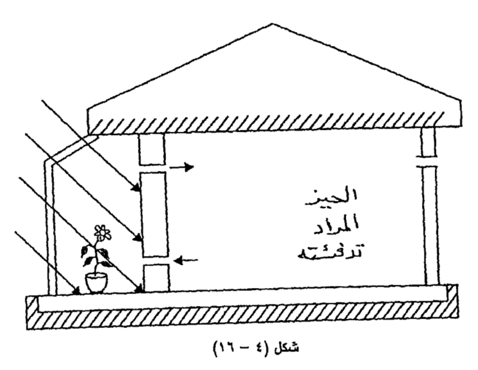
شكل (٤ – ١٥)

منظومة تدفئة سلبية غير مباشرة ذات حائط ممتص ومختزن

والفتحتان (أ)، (ب) اللتان يمكن فتحهما أو غلقهما موجودتان قرب أعلى الحائط الخرسانى المختزن وقرب أسفله، ففى أثناء النهار تبقى كلتا الفتحتين مفتوحة، ويسخن الهواء ما بين الزجاج الداخلى والجدار، وينساب إلى داخل الحجرة من خلال الفتحة العليا، وفى ذات الوقت ينسحب الهواء البارد من الغرفة إلى خارجها من خلال الفتحة السفلى، وبذلك تنشأ دورة من تيارات الحمل الطبيعية، كما يجرى انتقال للطاقة إلى الحجرة عن طريق الإشعاع من الوجه الداخلى للجدار المختزن، وإبان الليل تغلق كلتا الفتحتين وتنتقل الطاقة عن طريق الإشعاع فحسب.

ويتيح هذا التصميم بالمثل وسيلة للتهوية صيفًا، ففى الأيام الصيفية الحارة تفتح الفتحات (ب)، (جـ)، (د)، فى حين تغلق الفتحة (أ)، فينساب الهواء الساخن من بين الزجاج الداخلى والجدار خلال الفتحة (جـ) ساحبًا معه هواء الحجرة، ونتيجة لهذا ينسحب الهواء من الخارج خلال الفتحة (د) التى ينبغى أن يكون موضعها بحيث يأتى الهواء الذى ينسحب خلالها من منطقة ظليلة وباردة.

والدفيئة المبينة بشكل (٤ – ١٦) تجمع ما بين ملامح منظومات التدفئة السلبية المباشرة وغير المباشرة، فالدفيئة ذاتها تسخن مباشرة بفعل أشعة الشمس، ويسخن داخلها بطريقة غير مباشرة من خلال انتقال الحرارة بالتوصيل إلى الداخل عبر الجدار المقسم، ويمكن أن يجلب الهواء الدافئ المنتقل من الدفيئة إلى الحيز المراد تدفئته عبر فتحات الجدار الفاصل تدفئة إضافية، وعندما يصنع الجدار الفاصل من مادة شفافة تتحقق التدفئة المباشرة لداخل الحيز، وفى هذه الحالة يتحتم بالقطع استعمال عازل فوق الجدار الشفاف ليلاً.. ولمنع تجاوز التدفئة للحدود المعقولة صيفا لابد أن تزود الدفيئة بفتحات خارجية فى موضع مرتفع كوسيلة لطرد الحرارة.



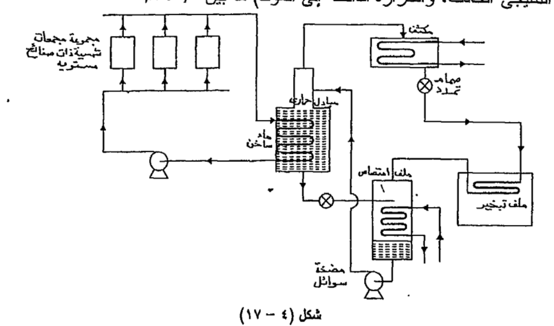
شكل (٤ – ١٦)

منظومة تسخين سلبية بتأثير الدفيئة

تبريد الأماكن:

لما كانت الحاجة إلى التبريد – سواء للأماكن السكنية أو للمواد الغذائية – تتعاظم بصفة عامة فى أوقات الحد الأعلى للإشعاع الشمسى، فإن التغيرات الموسمية فى تعرض سطح الأرض للشمس تتوافق توافقًا طيبًا مع الحاجة إلى التبريد لتوفير الراحة للبشر ولحفظ المأكولات، على أية حال، فالعيوب التى تكتنف استغلال طاقة الإشعاع الشمسى، من حيث طبيعتها المتقطعة وانخفاض درجة تركزها، تجعل من الضرورى تصميم أجهزة اقتصادية لتخزين الطاقة الشمسية وصرفها عند الحاجة بحيث تتغلب على العديد من العقبات العسيرة، ويتجلى هذا الأمر بصفة خاصة فى حالات استخدام الطاقة الشمسية فى أغراض التبريد مقارنة باستخدامها للتسخين، بالنظر أساسًا إلى الحاجة إلى مصدر حرارى ذى درجة حرارة مرتفعة نسبيًا لعمليات التبريد.

ونرى فى شكل (٤ – ١٧) رسمًا تخطيطًا لمنظومة تثلــيج بــسيطة تعمــل بامتصاص الطاقة الشمسية، وفيها يمر الماء من وحدات من مجمعات طاقـــة ذات ألواح مستوية خلال مبادل حرارى (يسمى بالمولد)، حيث تنتقــل الحــرارة إلـــى محلول هو خليط من المادة الماصة والمادة المثلجة (والخليط غنى بالوسيط المثلج)، وتحت ضغط مرتفع يتجه بخار الوسيط المثلج (وهو يغلى) إلى مكثف حيث يتكثف إلى سائل تحت ضغط عال، يمر بدوره خلال صمام خانق **throttling** فيتمدد إلـــى ضغط ودرجة حرارة منخفضين، ويمر خلال ملف مبخر **evaporator coil**. ولدى هذه المرحلة يمتص بخار مادة التثليج الحرارة، وبناء على ذلك يبرد الفراغ المحيط بالملف، ويمتص بخار مادة التثليج داخل خليط محلولى يتم سحبه من المولد حيــث التركيز الضعيف فى مادة التثليج، ويعاد ضخه كرة أخرى إلـــى المولـــد، وبهـــذا تستكمل الدورة، ومن أمثلة الخليط من مادتى التثليج والامتــصاص التـــى يـــشيع استعمالها ماء الأمونيا مع ماء بروميد الليثيوم، ويـــستعمل بروميـــد الليثيـــوم فـــى أغراض تكييف الهواء، وتتراوح قيمة معامل الأداء (وهو النسبة ما بـــين التـــأثير التثليجى الحادث، والحرارة الداخلة إلى المولد) ما بين ٠,٥، ٠,٨



شكل (٤ – ١٧)

منظومة تثليج شمسية بالامتصاص

التقنية الشمسية الكهروحرارية:

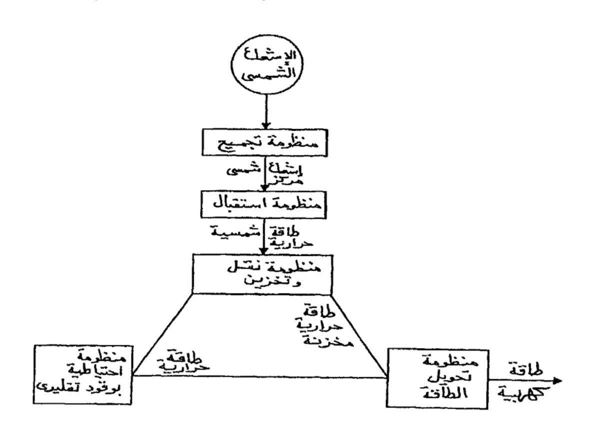
الضوء الشمسى هو أعظم مصادر العالم للطاقة، ولآلاف السنين استعملت الحضارة البشرية بفعالية الطاقة الشمسية – دون تركيزها – فى إنتاج الضوء والحرارة وفى استنبات المحاصيل الغذائية، وتتطور تقنيات اليوم صوب تركيز ضوء الشمس، وتسخير طاقته فى أغراض أخرى كتوليد الكهرباء، والبخار والماء الساخن للعمليات الصناعية.

ورغم أن أشعة الشمس المباشرة والانتشارية يمكن حشدها فى مصفوفات من المجمعات واستعمالها فى تدفئة المنازل أو إمدادها بالماء الساخن، إلا أن الأشعة دون تركيزها لا تكون بالشدة الكافية لتوليد القوى المحركة بالكفاءة اللازمة، ويستوجب ذلك أن تركز التقنيات الشمسية الكهروحرارية، قدرًا كبيرًا من ضوء الشمس على مساحة أصغر بما يسمح بتعظيم مقدار الحرارة المتاحة فى درجات حرارة عالية، والتى يمكن أن تتحول بدورها إلى كهرباء فى آلة حرارية تقليدية، وتعتمد محطات القوى الشمسية الحرارية على ضوء الشمس المباشر، ومن هنا يتعين إقامتها بالمناطق ذات الإشعاع الشمسى المباشر، ويبلغ مقدار الإشعاع الشمسى المتاح عند سطح الأرض – فى أقصى شدته – زهاء ١ كيلو وات للمتر المربع، ويتيح هذا لمحطات القوى الشمسية التى أحسن اختيار مواقعها نمطيًا ٢٥٠٠ كيلو وات ساعة لكل متر مربع من أشعة الشمس سنويًا – كحد أدنى – ويكافئ ذلك قيمة متوسطة يومية لضوء الشمس مقدارها ٦,٨ كيلو وات ساعة / م٢.

تقنيات المنظومات الحرارية الشمسية:

تعتمد كل تقنيات توليد القوى الحرارية الشمسية على أربع منظومات: المجمع – المستقبل (أو المتلقى) – النقل والتخزين، وتحويل الطاقة (شكل ٤ – ١٨)، ويقتنص المجمع الإشعاع الشمسى ويركزه وينقله إلى المستقبل الذى يمتص

ضوء الشمس المركز وينقل الطاقة الحرارية إلى المائع الوسيط، وتتولى منظومة النقل والتخزين توصيل المائع من المستقبل إلى منظومة تحويل الطاقة. وفى بعض محطات القوى الشمسية – الحرارية يدخر جزء من الطاقة الحرارية للاستعمال المستقبلى، وتتركب منظومة تحويل الطاقة من آلة حرارية والمعدات المتعلقة بها من أجل تحويل الطاقة الحرارية إلى كهربية، وتتضمن بعض التصميمات أيضًا مصدرًا حراريًا ثانويًا يعمل بالوقود الأحفورى يمكنه إما أن يشحن منظومة التخزين أو أن يشغل منظومة تحويل الطاقة فى خلال فترات ضعف ضوء الشمس.



شكل (٤ – ١٨)

تعتمد التقنيات الشمسية الكهروحرارية على منظومات

تجميع فاستقبال فتخزين ثم تحويل للطاقة

أنواع التقنيات الحرارية – الشمسية:

تطورت ثلاث تقنيات حرارية – شمسية رئيسية، تتميز كل منها من حيث شكل السطح ذى المرآة الذى يتجمع عليه ضوء الشمس ويتم تركيزه، وهذه التقنيات هى:

١) منظومة ذات مجرى أو حوض على شكل قطع مكافئ يركز الطاقة الشمسية على مستقبل أنبوبى موضوع على طول الخط البؤرى(*) لمجمع الحوض.

٢) منظومة ذات مستقبل مركزى تستعمل مرايا متحركة تتعقب الشمس (اسمها الهليوستات **heliostats** وتعكس الطاقة الشمسية على مستقبل / مبادل حرارى موضوع على قمة برج).

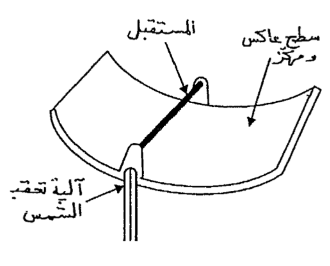
٣) منظومة ذات صحن عاكس له شكل قطع مكافئ يتعقب الشمس ويركز ضوءها إما على مستقبل / آلة أو مستقبل / مبادل حرارى مركب عند نقطة البؤرة من الصحن.

(١) منظومات المجرى على شكل قطع مكافئ:

المجرى – القطع المكافئ عبارة عن مجمع شمسى خطى يأخذ مقطعه شكل قطع مكافئ ويركز سطحه العاكس ضوء الشمس على مستقبل أنبوبى موضوع بطول خط بؤرة المجرى (شكل ٤ – ١٩ أ) يسخن المائع المار بالأنبوبة وينتقل إلى نقطة مركزية عبر شبكة من المواسير مصممة بحيث تكفل الحد الأدنى من الفقد الحرارى، والمجرى على شكل قطع مكافئ له خط بؤرى أفقى مفرد، وعلى ذلك فهو يتعقب الشمس بطول محور واحد فقط، إما شمالى – جنوبى أو شرقى –

(*) يقصد بالخط البؤرى الخط الذى يمر ببؤرة منحنى القطع المكافئ (المترجم)

غربى، ويحقق الاتجاه الشمالى – الجنوبى طاقة أعلى قليلا مما يحققه الاتجاه الشرقى – الغربى، إلا أن مردوده شتاءً منخفض لدى خطوط العرض المتوسطة، وعلى النقيض من ذلك يكفل الاتجاه الشرقى – الغربى مردودًا أكثر ثباتًا على مدار العام.



شكل (٤ – ١٩ أ)

مجرى بمقطع على شكل قطع مكافئ

(٢) المنظومات ذات المستقبل المركزى:

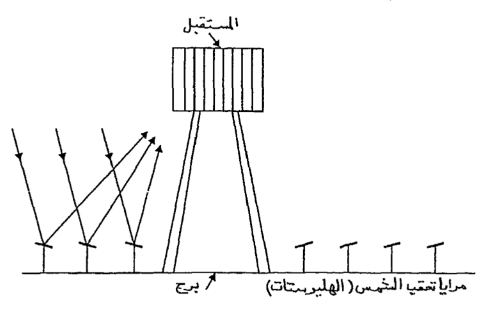
تتكون المنظومة ذات المستقبل المركزى من مرايا متعقبة للشمس، تعكس الطاقة الشمسية على جهاز استقبال مركب فوق برج (شكل ٤-١٩ب)، وتنتقل الطاقة الحرارية التى يمتصها المستقبل إلى مائع دوار فى دورة يمكن تخزينه لاستعماله فيما بعد لتوليد القدرة، وتتسم أجهزة الاستقبال المركزية بالخصائص العديدة التالية:

١) تجمع تلك الأجهزة الطاقة الشمسية ضوئيًا وتنقلها إلى مستقبل واحد بما يقلل من متطلبات نقل الطاقة الحرارية إلى أدنى حد.

٢) تحقق – كنمط شائع – معامل تركيز يتراوح ما بين ٣٠٠، ١٥٠٠، فهى ذات كفاءة عالية سواء فى تجميع الطاقة أو فى تحويلها إلى كهرباء.

٣) يسهل عن طريقها تخزين الطاقة الحرارية.

٤) ذات سعات كبيرة (تصل عامة إلى ١٠ ميجاوات وأكثر) ويمكن أن تعمل منظومات المستقبل المركزى فى درجات حرارة ما بين ٥٠٠، ١٥٠٠ °م.



شكل (٤ – ١٩ ب)

جهاز الاستقبال المركزى

(٣) المنظومات بصحن له شكل القطع المكافئ:

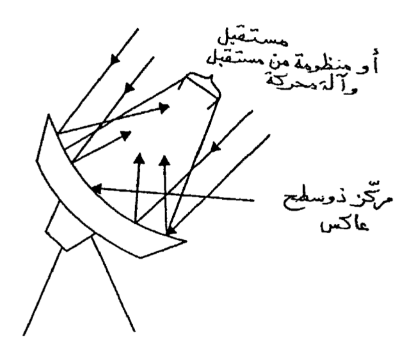
الصحن – القطع المكافئ هو مجمع للأشعة فى نقطة بؤرية، يتعقب الشمس فى محورين، ويركز الطاقة الشمسية على جهاز استقبال موضوع عند نقطة البؤرة من الصحن (شكل ٤ – ١٩جـ). ويمتص المستقبل طاقة الإشعاع الشمسى ويحولها إلى طاقة حرارية من خلال مائع دوار فى دورة، ويمكن إما أن تتحول

الطاقة الحرارية بعدئذ إلى كهرباء باستعمال آلة ومولد مقترنين مباشــرة بجهــاز الاستقبال، أو أن تنتقل فى مواسير إلـــى منظومـــات مركزيـــة لتحويـــل الطاقـــة، والصحون ذات شكل القطع المكافئ لها مزايا عديدة مهمة على رأسها:

١) نظرًا لأنها متجهة دومًا صوب الشمس فهى الأعلى كفـــاءة بـــين كـــل منظومات التجميع.

٢) تتراوح نسب تركيزها نمطيًا بين ٦٠٠، ٢٠٠٠، أى أنهـــا ذات كفـــاءة عالية فى امتصاص الطاقة الحرارية وتحويلها.

٣) لها وحدات تجميع واستقبال نمطية قياسية، يمكن أن تشغل إما مستقلة أو كجزء من مجموعة أكبر من الصحون ومنظومات الصحون على شكل قطع مكافئ يمكنها أن تحقق درجات حرارة تتجاوز ١٥٠٠ ° م.



شكل (٤ – ١٩ ج)

صحن على شكل قطع مكافئ

والمنظومات ذات المجرى بشكل قطع مكافئ هى الأكثر تطورًا من بين التقنيات الحرارية الشمسية، وتوجد بها الإنشاءات الرئيسية للعمليتين الحرارية وإنتاج القوى الكهربية، ورغم أن المنظومات ذات المجرى تعمل – نمطيًا – عند درجات حرارة من ١٠٠ إلى ٤٠٠ °م، وهى تقل كثيرًا عن الدرجات التى تحققها منظومات التركيز الأخرى، فإن تصميم المجرى يحقق ميزة المرونة والخبرة التجارية، ولأن كل نموذج قياسى مرتبط بالنماذج القياسية الأخرى من خلال سلسلة متنوعة ودوائر سريان متوازية، فيمكن أن تضبط المنظومة طبقًا لنطاق عريض من منحنيات الأداء.

الباب الخامس

تخزين الطاقة الشمسية

مقدمة:

يمكن تخزين الطاقة الشمسية فى صورة طاقة كهربية، أو كيميائية – ميكانيكية، أو كيميائية، ويمكن تحويل الطاقة الشمسية عن طريق الفولتية الضوئية – إلى كهرباء يمكن عندئذ تخزينها بصورة أسهل فى حاشدات (بطاريات) كهربية كطاقة كيميائية، والطاقة الكهربية المولدة من الطاقة الشمسية يمكن استعمالها أيضًا فى التحليل الكهربى للمياه، ويخزن المنتج النهائى من هذا التحليل – وهو الهيدروجين – كوقود للاستعمال المستقبلى، كما يمكن تخزين الطاقة الشمسية فى صورة مائية مختزنة.

والصورة الأكثر شيوعًا الآن، هى تخزين الطاقة الشمسية، المحولة إلى طاقة حرارية فى صورة حرارة محسوسة(*) أو كامنة محتواة فى وسيط سائل أو صلب، واختيار المادة الوسيطة هذه مؤسس على طبيعة العملية الحرارية الشمسية، ففى منظومات تسخين المياه، يكون الماء المخزن هو وسيط تخزين الطاقة، وفى منظومات تسخين الهواء، يجرى تخزين الحرارة المحسوسة فى طبقات من الحصى، والتخزين باستغلال التغيرات الطورية **phase change**، فى صورة الحرارة المصاحبة للانصهار مجد فى كثير من تطبيقات الطاقة الشمسية، وسيتم بحث هذه الموضوعات فى البنود التالية من هذا الباب.

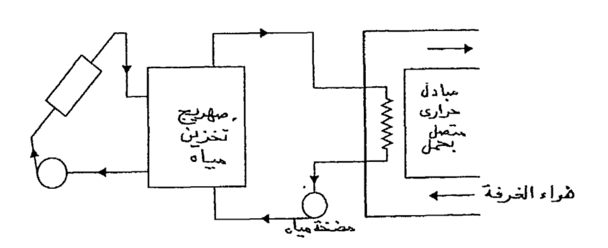
والسعة التخزينية اللازمة لضمان التشغيل المستمر لمنظومة طاقة شمسية يعتمد على مقدار الإشعاع الشمسى المتاح، وطبيعة العملية الحرارية، والتقييم

(*) الحرارة المحسوسة **sensible heat** هى تلك التى يصحب انتقالها تغير فى درجة الحرارة، وذلك بخلاف الحرارة الكامنة **latent heat** التى تنتقل ودرجة الحرارة ثابتة (المترجم)

الاقتصادى للموازنة بين الطاقة الشمسية ومصادر الطاقة المساعدة، والحيز المتاح وغيره من المتطلبات لسعة تخزينية بعينها يعتمد فـــى الأســـاس علـــى الخـــواص الفيزيائية والكيميائية للمادة الوسيطة المستخدمة.

تخزين المياه:

فى تطبيقات الطاقة الشمسية يشيع استخدام الماء كوسيط لتخـــزين الحـــرارة المحسوسة نظرًا لتكلفته القليلة ولارتفاع حرارته النوعية، واستخدام الماء كوســـيط مسخن سهل ومريح أيضًا عند استعماله كوسيط ناقل للمادة وللحرارة فى المجمعات الشمسية وفى المبادلات الحرارية (ذات الحمل)، ونظام تسخين الأمـــاكن بالطاقـــة الشمسية، حيث يستخدم الماء كوسيط مخزن وناقل، مبين تخطيطًا بشكل (٥-١).



شكل (٥ -١)

منظومة تسخين الأماكن بالطاقة الشمسية

تراتب الطبقات عند تخزين المياه stratification:

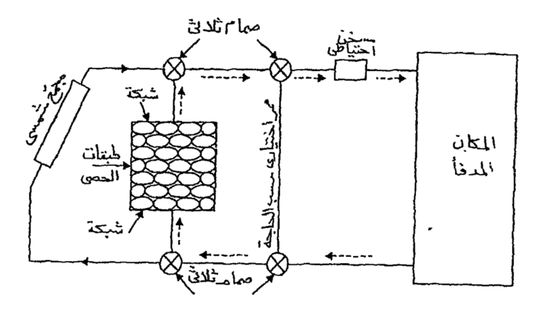
عند دخول الماء الساخن وخروجه من أعلى مستودع التخزين، ولدى سريان الماء البارد دخولا وخروجا بالقرب من قاعه، فمن المحتمل أن يتراتب الماء في طبقات بالمستودع بتأثير الاختلاف في الكثافة، وفي مستودع مياه تام التراتب تنخفض درجة الحرارة باطراد من قمة المستودع إلى قاعه، وبوجود الماء البارد بقاع المستودع يمكن الاحتفاظ بدرجة حرارة الماء الداخل إلى المجمع عند الحد الأدنى، وبذلك يتحسن أداء المجمع من خلال التقليل من الفاقد الحراري بتيارات الحمل من صفيحة المجمع، وفي ذات الوقت، يمكن أن يلبي الماء ذو أقصى درجات الحرارة بالقرب من قمة صهريج، الاحتياجات لأغراض التسخين بصورة أكثر فاعلية، ومن هنا فإن درجة التراتب الحراري، والتي تقاس بفرق درجات الحرارة بين قمة الصهريج وقاعه، عامل جوهري في فاعلية أداء منظومة الطاقة الشمسية.

ويصعب الاحتفاظ بهذا التراتب الحراري المرغوب، نظرا للحركة الامتزاجية التي يسببها ضخ المياه إلى المجمع وإلى المبادل الحراري (الحمل)، بالإضافة إلى التأثير الخلطي بسبب تيارات الحمل الطبيعية التي تحدث داخل خزان المياه، ولهذا السبب – وبصفة خاصة مع وحدات التسخين الصغيرة – ليس من الحكمة التعويل على عامل التراتب المرغوب هذا في صهاريج تخزين السوائل، وغالبا ما تظهر الحاجة للتنبؤ بدرجة التراتب الحراري في صهاريج تخزين السوائل عند تصميم منظومات الطاقة الشمسية الضخمة على النطاق التجاري.

التخزين فى الأحواض ذات الطبقات:

فى منظومات التسخين المعتمدة على الهواء، غالبًا ما تستعمل الأحواض ذات الطبقات كوحدة تخزين للطاقة. والحوض ذو الطبقات هو وعاء ضخم معزول ممتلئ بحصوات متراصة (دون تلاصق) يبلغ قطر كل منها بضعة سنتيمترات، ويؤدى دوران الهواء خلال الفجوات بين هذه الحصوات بالحوض إلى تولد تيارات حمل طبيعية وصناعية بين الهواء والصخور، ويوضح شكل (٥ – ٢)، رسما تخطيطيًا لوحدة تخزين بالحوض ذى الحصى، وأساليب تشغيله فى منظومة لتسخين الأماكن عن طريق الهواء.

وفى حالة سطوع الشمس، مع عدم الحاجة إلى تدفئة أية أماكن، يسرى الهواء الساخن من المجمع إلى قمة وحدة التخزين ليسخن محتويات حوض الحصى، وفيما يسرى الهواء إلى أسفل تنتقل الحرارة من الهواء للحصوات، مما يؤدى إلى توزيع تراتبى لدرجات الحرارة فى حوض الحصى، فتكون أعلاها عند القمة وأدناها لدى القاع، ويعود الهواء البارد بعدئذ إلى المجمع ليعاد تسخينه، وهذا هو وضع التخزين للوحدة، وفى حالة عدم إمكانية تجميع الطاقة الشمسية، مع وجود احتياج للتسخين، يسحب الهواء الساخن من قمة حوض الحصى إلى المكان المراد تدفئته، والذى يسحب منه الهواء البارد ويعاد إلى أسفل الحوض، وبذا يفرغ الحوض مخزونه من الطاقة، وهذا هو وضع التفريغ للوحدة، ومما هو جدير بالملاحظة أن عمليتى الشحن والتفريغ من وحدة التخزين ذات حوض الحصى لا يمكن إجراؤهما فى ذات الوقت.



شكل (٥ – ٢)

وحدة تخزين طاقة فى الحوض ذى الحصى فى منظومة تسخين بالطاقة الشمسية عن طريق الهواء (تبين الأسهم ذات الخطوط المتصلة اتجاه الهواء فى حالة التشغيل (تخزين الطاقة) بينما تبين الأسهم ذات الخطوط المتقطعة اتجاهه فى وضع تفريغ الطاقة

وهناك وضع تشغيلى ثالث للمنظومة وكما هو مبين بشكل (٥ – ٢) عند سطوع الشمس، وتواجد حمل حرارى فى نفس الوقت، فهنا يوجه الهواء الساخن من المجمع رأسًا إلى المكان المراد تدفئته، كما يوجه الهواء البارد من المكان مباشرة للمجمع، بحيث لا يعبر أى منهما خلال وحدة التخزين، وبالإمكان استخدام وحدة التسخين الاحتياطية لمعالجة نقص الطاقة فى المجمع أو الخزان لمواجهة الأحمال المطلوبة، وفى خلال مسار الهواء الذى لا يمر فيه على وحدة التخزين، يمكن الاعتماد على المسخن المساعد الاحتياطى فقط لتلبية كل الاحتياجات من الطاقة، وعلى خلاف صهريج تسخين المياه يمكن بسهولة المحافظة على تراتب درجات الحرارة فى حوض الحصى، وهى ميزة ينبغى الانتباه لها واستغلالها عند تصميم المنظومات الشمسية.

التخزين عن طريق التحولات الطورية:

عندما تتعرض مادة ما إلى تحول طورى بين الصورة الصلبة والصورة السائلة، مع تغير طفيف فى الحجم، فعادة ما يصاحب ذلك انطلاق مقدار كبير من الحرارة الكامنة، ويمكن تخزين طاقة التحول هذه ثم استخدامها فى تطبيقات استغلال الطاقة الشمسية. شريطة تحقق الاعتبارات الآتية:

١) ينبغى أن يكون التحول الطورى عند درجة حرارة متلائمة مع متطلبات حمل التسخين أو التبريد.

٢) يجب أن تكون العملية قابلة للانعكاس **reversible** عبر عدد كبير من الدورات، من غير ما انخفاض فى كفاءة الأداء.

٣) ينبغى أن يتوفر فى المادة المستخدمة الأمان ورخص السعر.

وتستعمل بعض هيدرات الأملاح كوسيط للتخزين فى عمليات التحول الطورى، فلهذه الأملاح الخواص التى تناسب ذلك، ويبين جدول (٥-١) خواص مجموعة من هيدرات الأملاح الملائمة لتخزين الطاقة الشمسية.

جدول (٥-١)

خواص بعض الأملاح المائية (المتميعة)

اسم المادة ورمزها الكيميائى	درجة حرارة التحول الطورى	حرارة الانصهار لوحدة الكتل	حرارة الانصهار(*) حجمًا
ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم (ص٢كب أ٤، ١٠ يد٢ أ)	٣٢ °م	٢٥١ كيلو جول / كجم	٣٧٣٠٠٠ كيلو جول /م٣
دوديكاهيدرات ثانى فوسفات الصوديوم (ص٢ يد فو أ٤، ١٢ يد ٢ أ)	٣٦ °م	٢٦٥ كيلو جول / كجم	٤٠٢٠٠٠ كيلو جول / م٣
بنتاهيدرات ثيو كبريتات الصوديوم (ص٢ كب٢ أ٣، ٥ يد٢ أ)	٥٠ °	٢٠٩ كيلو جول / كجم	٣٤٦٠٠٠ كيلو جول / م٣

وتصلح ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم لمتطلبات تخزين الطاقة لتدفئة الأماكن، وهى تتحلل وفقا للمعادلة:

ص٢ كب أ٤، ١٠ يد٢ أ + طاقة ⟵⟶ ص٢ كب أ٤ (صلب) + ١٠ يد٢ أ (سائل)

وتصل طاقة التحلل إلى ٢٥٠ كيلو جول / كجم، وتعتمد الطاقة المختزنة الكلية على مدى درجات الحرارة التى يسخن الملح إلى ما فوقها للحصول على

(*) الأرقام كما وردت بالأصل (المترجم)

تأثيرات الحرارة المحسوسة لكل من بلورات الملح والمحلول، وتنطلق الطاقة عندما تتبلر كبريتات الصوديوم ($ص_{٢}كب أ_{٤}$) فى الماء، مكونـــة ديكاهيـــدرات كبريتـــات الصوديوم ($ص_{٢}$ كب $أ_{٤}$، ١٠ $يد_{٢}أ$).

وتكمن المشكلة فى استعمال الأملاح المائية لتخزين الطاقة الشمسية فى فرط التبريد **super cooling** وانفصال الأطـــوار **phase separation**، وظـــاهرة فـــرط التبريد تحدث عندما تبرد مادة فى حالة سائلة إلى ما دون درجة تجمـــدها دون أن تتبلر، فإذا ما حدث لمحلول ملحى فرط تبريد (من ١٠ إلى ١٥ °م) فـــإن اســـتعادة الحرارة الكامنة المختزنة يكون عند درجة حرارة أقل بكثير مـــن تلـــك اللازمـــة لأغراض التدفئة، ويمكن استعمال البوراكس ($ص_{٢}ب_{٤}أ_{٧}$، ١٠$يد_{٢}أ$) مع ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم كنواة للبلورة من أجل التقليل من ظاهرة فرط التبريد.

ودرجة انصهار ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم غيـــر ملائمـــة، إذ أنهـــا بتسخينها إلى ما بعد درجة التحول الطورى تنفصل إلى كبريتات صوديوم فى حالة صلبة ومحلول مائى من نفس المادة، وحيث إن الملح الذى لا يحتوى على مياه ذو كثافة أعلى من كثافة المحلول فإن هذا الانفصال الطـــورى يحـــدث فـــى وعـــاء التخزين، وعند انطلاق الحرارة لا يكون الطوران ممتزجين بما فيه الكفاية كى يتم التحول المعاكس، مما يفضى إلى تدهور الأداء بسبب عدم اكتمال التبلر، ويمكـــن التغلب على مشكلة الانفصال الطورى بسهولة باستعمال مادة هلامية **gel** أو بالحـــد من ارتفاع الوعاء الرأسى.

مثال: استعملت ديكاهيدرات الصوديوم كمادة وسيطة لتخزين الطاقـــة عـــن طريق التحول الطورى فى منظومة للتسخين الشمسى، فإذا سخن الملح مـــن ٢٥ ° إلى ٥٠ °م، ما مقدار الطاقة المختزنة لكل وحدة كتلة من الملح؛ علمًا بأن الحرارة النوعية لبلورات الديكاهيدرات = ١,٩٥ كيلو جول / كجم. ° كلفـــن، ٣,٥٥ كيلـــو جول / كجم. ° كلفن لمحلول الملح اللامائى؟

الحل: الوحدة المخزنة لكل وحدة كتلة = ن ص (د – د ١) + ح ك + ن س (د٢–د)

حيث: ن ص = الحرارة النوعية للملح فى الحالة الصلبة= ١,٩٥ كيلو جول/ كجم. ° ك.

ن س = الحرارة النوعية للملح فى الحالة السائلة = ٣,٥٥ كيلو جول / كجم. ° ك.

ح ك = الحرارة الكامنة للتحول الطورى = ٢٥٠ كيلو جول / كجم.

د = درجة حرارة الانصهار = ٣٢ ° م.

د ١ = درجة الحرارة الابتدائية للسائل = ٢٥ ° م.

د ٢ = درجة حرارة السائل النهائية = ٥٠ ° م.

فتكون كمية الحرارة المختزنة لكل كيلو جرام من ديكاهيدرات كبريتات الصوديوم:

١,٩٥ (٣٢ – ٢٥)+ ٢٥٠ + ٣,٥٥ (٥٠ – ٣٢)=٣٢٨ كيلو جول.

الحوض الشمسى:

تتوفر الطاقة الشمسية – كمصدر متجدد ومتاح بوفرة فى كل أجزاء العالم، وتتركز ميزتها الحقيقية هذه فى الأوقات التى يعانى فيها العالم من نقص الطاقة، غير أن تسخير الطاقة الشمسية على نطاق واسع تواجهه صعوبتان جوهريتان، تنبعان من خاصيتى الإشعاع الشمسى الأساسيتين، وهما:

١ – انخفاض كثافة الطاقة.

٢ – التفاوت الكبير فيها.

فانخفاض كثافة الطاقة يعنى أن مساحة المجمع اللازم لتجميع طاقة شمسية تكافئ ما يعطيه برميل نفط يوميًا، وبكفاءة متوسطها ٥٠% للمجمع، تصل إلى ٥٢٠م٢، ومثل منظومة التجميع هذه تتكلف استثمارات باهظة من مصادر متعددة، والمشكلات الأخرى الناجمة عن كبر مساحة المجمع تتضمن:

١ – نقل الطاقة المجمعة من مواقع مختلفة إلى نقطة استغلال مركزية واحدة، وهو ما يفضى ليس إلى ارتفاع التكاليف فحسب، بل إلى انخفاض كفاءة استغلال الطاقة، بسبب الفاقد الحرارى.

٢ – ضرورة الحفاظ على نظافة هذه المنظومة الضخمة بحيث يستفاد بأكبر مقدار ممكن من الطاقة.

فإذا ما جمعنا ما بين تجميع الطاقة الشمسية وتخزينها، وبالتقليل من الاعتماد المكثف على مواد الإنشاءات المدنية وأساليبها، فإن (مستودعات) الطاقة الشمسية تقدم الحل للعديد من المشاكل، والمستودع الشمسى هو (بحيرة) صناعية مبنية، ترتفع فيها درجة الحرارة بدرجة محسوسة فى مناطقها السفلية عن طريق منع تيارات الحمل، وغالبًا ما يطلق عليها تعبير أكثر تحديدًا هو "المستودعات الشمسية ذات الملوحة المتدرجة" أو "المستودعات الشمسية بدون تيارات حمل". وتبدو الميزة الاقتصادية للمستودعات الشمسية مع الاستخدامات ذات المساحات الشاسعة، ومن المرجح أن ينتشر استعمالها مستقبلا متى حلت المشكلات المتعلقة بتشغيلها وصيانتها.

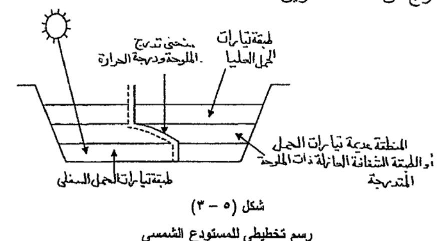
أساس عمل (المستودع الشمسى):

مما هو معروف جيدًا أن كثافة الموائع (كالماء والهواء)، تنخفض بالتسخين، فتطفو لأعلى، وفى بركة أو بحيرة طبيعية، يسخن الماء بفعل أشعة الشمس، ويرتفع الماء الساخن من داخل البركة واصلا للسطح، ويفقد حرارته للجو.. والنتيجة المحصلة لذلك هو بقاء درجة حرارة ماء البركة مساوية – تقريبًا –

لدرجة حرارة الجو، أما المستودع الشمسى فيبطل هذه الظاهرة بإذابة الملح بالطبقات السفلى من البركة بحيث يتسبب ثقلها فى عدم الارتفاع لأعلى (حتى مع ارتفاع درجة حرارتها)، وبالتالى فى عدم برودتها.

وبالبحيرة الشمسية ثلاث مناطق (شكل ٥ – ٣)، فالمنطقة العليا (منطقة السطح أو منطقة تيارات الحمل)، لها درجة حرارة الجو ونسبة ملوحتها قليلة، فى حين أن المنطقة السفلية ساخنة للغاية (٧٠ – ٨٠ °م) وذات ملوحة عالية جدًا، وهى الطبقة التى تجمع الطاقة الشمسية وتخزنها فى صورة حرارية، وعلى ذلك يطلق عليها منطقة التخزين أو المنطقة منخفضة تيارات الحمل، ويفصل بين الطبقتين طبقة مهمة هى طبقة التدرج أو الطبقة عديمة تيارات الحمل، وفيها ترتفع نسبة الملح بالاتجاه نحو الأسفل، مولدة نوعًا من منحدر فى الملوحة أو فى الكثافة، فإذا ما اعتبرنا طبقة بعينها فى هذه المنطقة، فإن الماء فيها ليس بمقدوره أن يرتفع لأعلى، إذ أن الماء الذى يعلوه أقل ملوحة، وبالتالى أقل كثافة.

وبالمثل لا يستطيع ماء هذه الطبقة الهبوط لأسفل لأن الماء أسفله أعلى ملوحة وبالتبعية أكبر كثافة، فهذه الطبقة الثابتة ذات الملوحة المتدرجة تعمل عمل عازل شفاف، يسمح لضوء الشمس أن يبلغ منطقة القاع ويبقى محتبسا هناك، وتستخلص الطاقة المفيدة من المستودع الشمسى فى صورة الماء المالح الساخن الذى يستخرج من منطقة التخزين.



شكل (٥ – ٣)

رسم تخطيطى للمستودع الشمسى

وعادة ما تكون المنطقة العليا حيث تيارات الحمل، ذات سمك قليل (نحو ١٠ – ٢٠ سم) وللمنطقة عديمة تيارات الحمل سمك أكبر، بحيث تحتل أكثر من نصف عمق البحيرة، وتضارع المنطقة السفلى ذات تيارات الحمل فى سمكها، المنطقة التى ليس بها تيارات حمل، والمستودع الشمسى النمطى ذو عمق ١ – ٢ م ويبطن قاعه بمادة بلاستيكية شديدة التحمل، وتذاب فى الماء الأملاح من نوعيات كلوريد المغنسيوم وكلوريد الصوديوم، ونترات الصوديوم.

مشروع المستودع الشمسى (بوج Bhuj):

مشروع المستودع الشمسى "بوج" هو مشروع تطوير وبحث، وقد تمت إقامته فى إطار برنامج قومى للمستودعات الشمسية، وهو مشروع استحدثته ونهضت به مجموعة من العلماء عام ١٩٨٣ تحت قيادة الدكتور الراحل ك. س. راو، ومن بعده مدير "وكالة جوجارات لتطوير استغلال الطاقة"، وقد صدر به قرار رسمى عن وزارة مصادر الطاقة غير التقليدية بالحكومة الهندية عام ١٩٨٧، ويصل ما رصد له إلى مبلغ ٨,٧٣ مليون روبية هندية.

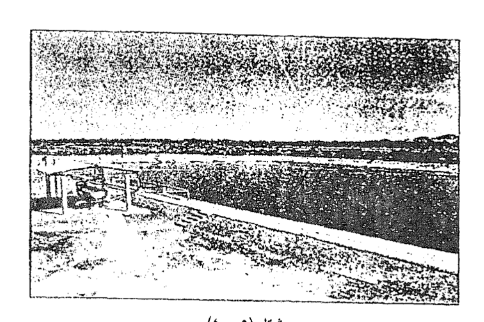
وهو مشروع تعاونى بين وكالة "جوجارات" ببارودا، ومعهد تاتا لبحوث الطاقة بنيودلهى، وهيئة جوجارات لتنمية صناعة الألبان بجاند هيناجار، وقد تكفلت (تاتا) بكل النواحى الفنية، بخلاف التنفيذ الكامل للمشروع، والمستودع الشمسى المقام على مساحة ٦٠٠٠م٢ فى بنايات مصنع ألبان كوتش يمده بنجاح بالحرارة اللازمة لعمليات المصنع منذ أوائل سبتمبر ١٩٩٣، وهو الآن أكبر مستودع شمسى يجرى تشغيله فى العالم.

مكونات المشروع:

تبلغ أبعاد الحوض الشمسى مائة متر طولا وستين مترًا عرضًا ويبلغ عمقه ٣,٥ م، وبجانبه أحواض تبخير (لإعادة تدوير الملح)، وحوض شمسى تجريبى بمساحة ٢٢٥م٢، كما تم بالمثل بناء حوض لمزج الأملاح، ولمنع رشح الماء المالح وتسربه، اتبع أسلوب خاص لتبطينه يتضمن استعمال المواد المتاحة محليا فى ذلك، وتتكون مادة التبطين من طبقات مدمجة جيدًا من الطفل الصينى والبوليثلين، وبعد تبطينه ملئ الحوض بالماء وأذيب به ٤٠٠٠ طن من الملح المعتاد، لتكوين محلول ملحى كثيف، وتم تخليق منحدر للملوحة المتدرجة بعد ذلك، كما أقيمت شبكات لصد الأمواج ومنصة خاصة للحصول على عينات وممرات ينساب خلالها تيار المحلول الملحى الساخن المسحوب، وأخرى يطرد خلالها، وما إلى ذلك... وقد بدأ استخلاص الحرارة من المشروع بعد تركيب المبادلات الحرارية.

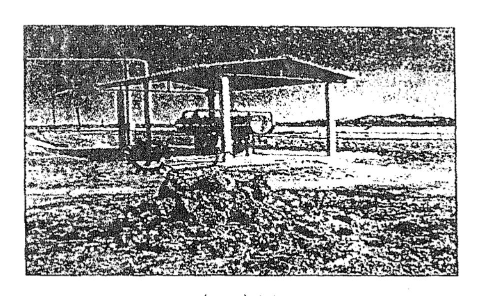
تزويد العمليات الصناعية بالحرارة:

يستعمل حوض بوج الشمسى فى الوقت الراهن فى تزويد معمل ألبان كونش بالحرارة، ولإنجاز ذلك أقيم مبادل حرارى من نوع الصفائح والأنابيب **shell & tube**، حيث يدور المحلول الملحى الساخن المستخلص من باطن الحوض، مسخنًا للمياه، ويغذى الماء الساخن بدوره فى المرجل **boiler** إلى جانب استخدامه فى عمليات التنظيف والغسل، ويصل حجم المياه المتدفقة يوميًا – فى درجة حرارة ٧٠° – إلى ٨٠٠٠٠ لتر، وبهذا فالمشروع هو أول مشروع بالبلاد يوضح فائدة تطبيق تقنية الأحواض الشمسية لتزويد العمليات الصناعية بالحرارة اللازمة لها.



شكل (٥ – ٤)

حوض بوج الشمسى (٦٠٠٠م٢)



شكل (٥ – ٥)

المبادل الحرارى للحوض الشمسى

استعمالات الأحواض الشمسية:

تتعدد الاستخدامات للطاقة المجمعة بواسطة الأحواض الشمسية.

إمداد العمليات الصناعية بالحرارة:

بخلاف التزويد بالماء الساخن، يمكن استعمال الأحواض الشمسية للحصول على الهواء الساخن اللازم للصناعة أو فى التدفئة، كما يمكن استخدامه فى تجفيف المحاصيل الزراعية والأسماك والمواد الكيميائية، بالإضافة إلى معالجة الأخشاب الموسمية، ويمكن تجفيف العديد من الكيماويات غير العضوية ومواد الصباغة وغيرها عند درجات أدنى من ٨٠° م، وهى ما يمكن الوصول إليها بسهولة فى الأحواض الشمسية.

تحلية المياه:

من أهم التطبيقات النافعة للأحواض الشمسية، استعمالها للحصول على مياه الشرب التى تجابه الكثير من المدن والقرى بالهند نقصا حادًا فيها، ويقع العديد من هذه القرى على امتداد المناطق الساحلية، أو فى مواقع يمكن الحصول فيها على زيت الملح (*) **bittern** بأسعار زهيدة، بالإضافة إلى ذلك فهناك ندرة فى ماء الشرب اللازم للعاملين فى أغلب مصانع الملح، والأحواض الشمسية التى تعمل على أساس منظومة تحلية المياه تقدم حلا اقتصاديًا للحصول على المياه العذبة من الماء قليل الملح أو من مياه البحر، وتضم المنظومة الكاملة: الحوض الشمسى، ووحدة تقطير مياه متعددة المراحل بالتبخير عند درجة حرارة منخفضة، ومبادلا حراريًا ومكثفًا، ومجموعة مضخات إلى آخره.

(*) زيت الملح **bittern** هو المحلول المر من أملاح البروميد والمغنسيوم والكالسيوم المتخلف بعد تبلور كلوريد الصوديوم من مياه البحر (المترجم)

التجميد:

منظومات التبريد عن طريق امتصاص البخار، ملائمة للاستعمال مع الأحواض الشمسية، والتأثير التبريدى الناتج عنها يمكن استعماله فى تبريد الألبان، وتخزين اللبن ومنتجاته والتخزين البارد عمومًا وفى تكييف الهواء.

وتحتوى المنظومة الكاملة على جهاز تبريد عن طريق امتصاص البخار ومضخات ومبادلات حرارية وما إلى ذلك، إلى جانب الحوض الشمسى.

توليد القوى المحركة:

يمكن استخدام الطاقة الحرارية المختزنة فى الحوض الشمسى بالمثل فى توليد القوى الكهربية باستعمال آلة تعمل على أساس دورة رانكين العضوية(*)، وتتكون المنظومة المتكاملة من مصدر للبخار، وتوربين ومكثف ومضخات ونظم مناوبة **alternators** وخلافه، إلى جانب الحوض الشمسى.

اقتصاديات الحوض الشمسى:

لقد جرت مقارنة التكاليف السنوية المكافئة لتطبيق نظام الحوض الشمسى فى مختلف التطبيقات بتكاليف التقنيات التقليدية وكما يبينها الجدول (٥ – ٢)، اعتمادًا على الخبرة المكتسبة من تشغيل حوض (بوج) الشمسى، ويظهر من الجدول كيف يبدو الحوض الشمسى بديلا تصلح مقارنته بغيره، علما بأن انتشار استخدام الأحواض الشمسية كفيل بتقليص تكلفتها الأولية بنسبة محسوسة، وبدعم حكومى فى شكل حوافز (كاعتبار نسبة الإهلاك ١٠٠%) من الممكن أن تصبح الأحواض الشمسية أكثر بدائل استغلال الطاقة الشمسية قابلية للتطبيق فى العديد من المواقع.

(*) دورة رانكين **Rankine cycle** هى دورة ثرموديناميكية مغلقة تتحول فيها الحرارة إلى شغل ميكانيكى ويكون المائع المستخدم فيها عادة هو الماء، أما فى دورة رانكين العضوية فيستعمل مائع ذو وزن جزيئى كبير بما يسمح باستنقاذ الحرارة من النفايات (المترجم)

جدول (٥ – ٢)

التكاليف السنوية المكافئة لمختلف التطبيقات المستعملة للأحواض الشمسية

مجال الاستخدام	الطرق التقليدية	الحوض الشمسى	النظم الشمسية الأخرى
التسخين فى العمليات الصناعية: روبية / كيلو وات ساعة	٠,٥٦ (أ)	٠,٣٤	٠,٧٠ (ب)
تحلية المياه: روبية /م٣	٧٥ (جـ)	٧٦	٣٥٠ (د)
التبريد: روبية/ كيلو وات ساعة	٠,٨٨	٠,٩٢	–

ملحوظات جدول (٥ – ٢):

(أ) بإحراق الفحم.

(ب) باستخدام مجمعات الطاقة الشمسية الصفيحية.

(جـ) باستخدام تقنية الغشاء **membrane**.

(د) أجهزة تقطير السوائل بالطاقة الشمسية.

تشغيل وصيانة بطاريات (حاشدات) التخزين المستعملة فى المنظومات الكهروضوئية:

بطاريات الرصاص الحامضية هى اليوم أكثر الأنواع شيوعًا كوسيط للتخزين فى التطبيقات الكهروضوئية، ويتميز هذا النوع من البطاريات بكفاءتها التشغيلية العالية (تتراوح عادة ما بين ٧٠، ٨٠%) وتكاليفها المنخفضة نسبيًا ومعدل تفريغها الذاتى المنخفض (إذا ما خلت من عنصر الأنتيمون)، وتشمل

عيوبها انخفاض تيارى الشحن والتفريغ المسموح بهما، وقلة عدد المرات المسموح بها للتفريغ العميق(*)، وسنبحث الآن تشغيل وصيانة البطاريات التى تستعمل فى المنظومات الكهروضوئية، وكذلك تأثير إضافة حمض الفسفوريك لتقليل عملية التفريغ الذاتى للحد الأدنى.

تركيب البطارية والتفاعلات الكيميائية بها:

تتكون كل خلية بالبطارية من عدد من الصفائح ذات شحنات موجبة وسالبة، وتفصل هذه الصفائح عن بعضها بحواجز من مادة مسامية غير موصلة للكهرباء كالبلاستيك أو الخشب أو المطاط، ويستعمل – كمحلول كهربائى – حمض الكبريتيك المخفف والماء، وتمنع الحواجز الأقطاب من التلامس مع بعضها وإن كان محلول التحليل الكهربائى يتخللها ويتسرب خلالها.

وفى بطاريات الرصاص الحمضية تصنع الشبكات إما من سبيكة الرصاص مع الأنتيمون أو الرصاص مع الكالسيوم، ويكسب الأنتيمون أو الكالسيوم الشبكة قوة أكثر مما يصنع الرصاص النقى، ويؤثر نوع السبيكة المستعملة على عمر البطارية وعلى متطلبات صيانتها، وعندما تتقدم البطارية ذات الشبكة المصنوعة من الرصاص والأنتيمون فى العمر يهجر الأنيتمون الشبكة متجهًا إلى الصفيحة السالبة، وهو ما يغير من كيميائية البطارية ويؤدى إلى تفريغ ذاتى جزئى، ويزيد نسبة تصاعد الغازات خلال عملية الشحن، وعلى ذلك فمع تقدم البطارية فى العمر تزيد قيمة التيار اللازم للمحافظة على مستوى الشحن، كما يتكرر الاحتياج إلى إضافة الماء دوريًا.

(*) يقصد بالتفريغ العميق **deep discharging** تفريغ البطارية تفريغًا شبه.كامل حتى ٢٠% أو أقل من سعتها (المترجم)

وعند تسليط فرق جهد على صفائح البطارية، يتم تفاعل كيميائى، هو عكس التفاعل الحادث عندما تتخذ البطارية مصدرًا للتيار، وفى خلية تامة الامتلاء تأخذ الصفيحة السالبة شكل الإسفنجة أو الرصاص الطرى ذى اللون الرمادى، فى حين تصنع الصفيحة الموجبة ذات اللون البنى القاتم من بيروكسيد الرصاص.

وعندما ينساب التيار الكهربى من البطارية يتحلل حمض الكبريتيك إلى أيونات هيدروجين وأيونات كبريتات، وعند الصفيحة السالبة تتحد أيونات الكبريتات مع الرصاص الإسفنجى لتكوين كبريتات الرصاص ذات اللون الرمادى الضارب للبياض، ولدى الصفيحة الموجبة يفقد بيروكسيد الرصاص أكسجينه إلى أيون الهيدروجين مكونًا الماء.

وتتحدد أيونات الرصاص مع أيونات الكبريتات مكونة كبريتات الرصاص، وعلى ذلك فلدى التفريغ، تتبدل الصفائح السالبة والموجبة من رصاص إسفنجى وبيروكسيد رصاص على الترتيب إلى كبريتات رصاص، ويتحول محلول التحليل الكهربى من حمض كبريتيك عالى التركيز إلى تركيز أقل، والتفاعلات تمثلها المعادلات التالية:

رأ٢ + ٢يد + يد٢ كب أ٤ ⟵ ر كب أ٤ + ٢ يد ٢ أ عند الصفيحة الموجبة.

ر + أ + يد ٢ كب أ٤ ⟵ ر كب أ ٤ + يد ٢ أ عند الصفيحة السالبة.

وفى حالة تمام امتلائها، تعطى الخلية انحرافًا فى قراءة الفولتمتير (بمقدار ٢,٢ فولت) فى حين تبين قراءة مقدارها ١,٧٥ فولت فى حالة تمام تفريغها.

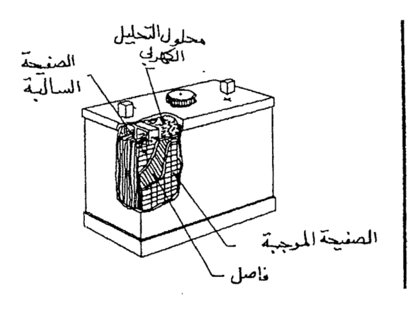
ومع إعادة شحن البطارية من جديد، ينعكس التفاعل الكيميائى، فيتحلل جزىء الماء إلى أيونات هيدروجين وأكسجين، وتجتذب أيونات الهيدروجين أيونات الكبريتات مكونة حمض الكبريتيك، ومع حدوث هذه العملية تتحول الصفيحة

السالبة إلى رصاص إسفنجى، بينما تتحد الصفيحة الموجبة بالأكسجين لتكوين بيروكسيد الرصاص، وهما التفاعلان اللذان يقعان فى عملية الشحن.

ر كب أ$_{٤}$ + كب أ$_{٤}$ + ٢يد$_{٢}$أ ⟵ ر أ$_{٢}$ + ٢يد$_{٢}$كب أ$_{٤}$ عند الصفيحة الموجبة

ر كب أ$_{٤}$ + ٢ يد ⟵ ر + يد$_{٢}$ كب أ$_{٤}$ عند الصفيحة السالبة

وخلال الشحن تنبعث كميات قليلة من الأكسيجن والهيدروجين، وتفلت من خلال فتحات أصابع البطارية (شكل ٥ – ٦). وينبغى أن تحفظ البطاريات دائمًا فى فضاء مفتوح (فالأكسجين والهيدروجين قد يكونان قابلين للانفجار)، والأكسجين والهيدروجين الهاربان من البطارية يأتيان من الماء المتحلل كهربيًا، وتقل كمية الماء فى المحلول الكهربى، وعلى ذلك فلابد من إضافة الماء المقطر بصفة دورية لتعويض الماء المفقود فى هيئة غازات.



شكل (٥ – ٦)

أجزاء الحاشدة (البطارية)

عمر البطارية:

عندما تتم البطارية عمل دورات كاملة أى كلما فرغت تماما بعد أن كانت تامة الامتلاء، تبدأ فى فقدان القدرة على تحويل كبريتات الرصاص إلى بيروكسيد رصاص أو رصاص إسفنجى، ومن ثم يتصلد جزء من الكبريتات ويصبح قصيفا هشا، مما يقلل من سعة البطارية معبرًا عنها بالأمبير. ساعة (وتعرف هذه العملية بالكبرتة أو التشبع بالكبريتات **sulphation** وهى عملية لا انعكاسية)وبالتدريج تفقد البطارية صلاحيتها للاستعمال.

وعدم شحن البطارية بالكامل، أو الإفراط فى شحنها أكثر من اللازم لهما بالمثل تأثيرهما على عمر البطارية، وإذا ما تركت البطارية لفترة مديدة وهى فى حالة شحن ضعيف (أى فارغة بنسبة ٧٠ أو ٨٠% مثلاً)، تتشبع الصفائح بالكبريتات، ويصعب عندئذ شحنها ثانية، ويحدث الشحن الضعيف أيضًا إذا لم تشحن البطارية على الإطلاق حتى سعتها القصوى، فإذا لم تصل نسبة شحن البطارية أبدًا إلى أكثر من ٨٠% فإنها فى النهاية تفقد ٢٠% من سعتها.

ويؤدى ضعف شحن البطارية إلى تراكم الكبريتات، فى حين يدمر الإفراط فى الشحن الصفائح فيزيائيًا، فإذا كانت البطارية تامة الشحن، فإن أى شحن إضافى يفضى إلى خروج الماء من المحلول الكهربى فى هيئة أكسجين وهيدروجين، وإذا زاد الإفراط فى الشحن الإضافى، فقد تتسبب فقاعات الغاز المتسرب سريعًا إلى خلخلة فى مادة الصفيحة وعدم ثباتها، ومتى شح الماء فى المحلول الكهربى، ارتفع تركيز حمض الكبريتيك، وإذا زاد هذا التركيز عن حد معين، تآكلت الصفيحة كيميائيًا، وللإفراط فى الشحن أيضًا أثره الحرارى الضار، إذ يتسبب فى اعوجاج الصفيحة، والشحن المفرط قليلا – بمعدل مرة كل شهر مثلا – قد يقلل من مشكلة تراكم الكبريتات ويعيد تركيز حمض الكبريتيك إلى مستواه المرغوب.

ووزن البطارية عامل مهم فى تحديد عمرها المتوقع، كما يحدد الرصـــاص بها سعتها وعمرها المتوقع.

فعلى سبيل المثال، فإن بطارية وزنها ٥ كجم، معايرة علـــى ٢٢٥ أمبيـــر. ساعة لن تزيد فى العمر على بطارية وزنها ١٥ كجم لها نفس المعايرة.

توصيلات البطارية:

عند توصيل البطاريات على التوالى نحصل على ارتفاع فى فـــرق الجهـــد المطلوب، فى حين يبقى معدل الأمبير. ساعة مساويًا لمعدله لبطارية مفردة، فعلى سبيل المثال إذا وصلت ١٦ بطارية (مواصفات كل منها ٢ فولـــت، ١٠٠ أمبيـــر ساعة)على التوالى، فإن فرق الجهد الكلى للمجموعة سيكون ٣٢ فولتا والسعة هى ١٠٠ أمبير ساعة، وتكون سعة التخزين = ٣٢ x $\frac{١٠٠}{١٠٠٠}$ = ٣,٢ كيلو وات ساعة.

ولزيادة سعة التخزين، وبعبارة أخرى السعة بـــالأمبير. ســـاعة لمجموعـــة بطاريات مع الحفاظ على نفس الجهد الكهربى، توصل البطاريات على التـــوازى، والبطاريات الموصلة على التوالى يجب أن يكون لها جميعًا نفس السعة معبرًا عنها بالأمبير. ساعة، وعند شحن مجموعة من البطاريات ذات سعات متفاوتـــة وهـــى موصلة على التوالى، لا تشحن البطارية ذات السعة الأقل شحنًا كافيًا، وإذا وصلت بطارية واحدة فى وصلة على التوالى فى عكس الاتجاه، فإن شحنتها ســـتفرغ، وإذا استمر هذا الوضع كذلك لفترة طويلة فإنها ستبدأ فى إعـــادة الـــشحن فـــى عكـــس الاتجاه، وتتحول الصفيحة السالبة إلى بيروكسيد الرصاص والصفيحة الموجبة إلى رصاص إسفنجى، ولا يمد هذا الشحن العكسى فى عمر البطاريـــة، والبطاريـــات الموصلة على التوازى ينبغى أن يكون لها نفس الفرق فى الجهد، فإذا ما وصـــلت بطارية فرق جهدها ٦ فولت على التوازى بأخرى ذات فرق جهد ١٢ فولتًا، فـــإن فرق الجهد بينهما سيتعادل، وستفرغ البطارية ذات الـــ ١٢ فولتًا شحنها فى صورة تسخين الأسلاك الواصلة بين البطاريتين.

قياس مستوى الشحن:

تستخدم عدادات قياس مـن نوعيـة الهيـدرومتير والفـولتميتر والمؤشـر الإلكترونى عموما لقياس مستوى الشحن، ويقـيس الهيـدرومتر الـوزن النـوعى للمحلول الكهربائى (الإلكترولايت)، والوزن النوعى لحمـض الكبريتيـك يـساوى ١,٨٤٠، وللماء ١,٠٠، والمحلول الإلكتروليتى بالبطارية مكون من الماء وحمض الكبريتيك، فوزنه النوعى بين ١,٠٠، ١,٨٤٠، وفى واقع الحال تصل قيمتـه إلـى ١,٣٠ عند تمام شحن البطارية، ١,١١٠ عند تفريغها تمامًا.

وهناك قاعدة عامة تتبع لمعرفة مستوى شحن البطارية، تعتمد على قـراءة الهيدرومتر، فكل تغير قدره ٠,٠٣ أى ٣٠ نقطة اعتبارًا من الحد الأقصى للـوزن النوعى يؤشر لتغير مقداره ٢٥% فى مستوى الشحن، فمثلا يصل الوزن النـوعى لبطارية تامة الشحن إلى ١,٣٠ ويهبط إلى ١,٢٧ إذا ما فقدت ٢٥% من شحنها.

وتختلف القراءة القصوى للهيدرومتر لبطارية كاملة الـشحن وفقًـا لنـوع البطارية وتصميمها ومنتجها، ومن الموصى به التأكد مـن قيمـة هـذه القـراءة القصوى قبل استعمال البطارية، وللبطاريات ذات الدورة العميقة(*) تتـراوح هـذه القيمة ما بين ١,٢٧٥، ١,٣٠٠ ولبطاريات سيارات الركوب، تصل لنحـو ١,٢٦، وللبطاريات من النوع الطافى(**) أو المثبت لحوالى ١,٢١.

وتسجيل قراءة الفولتميتر يعد أيسر الوسائل فـى مراقبـة مـستوى شـحن البطاريات، ويشير الفولتميتر إلى قيمة ١,٧٥ فولت للبطارية الفارغة تمامًا (إذا مـا كانت الخلية خارج الخدمة)، وتقع القراءة – لبطارية تامة الشحن – ما بـين ٢,١، ٢,٢ فولت، ويمكن تحديد فولتية كل خلية بإضافة الـرقم ٠,٨٤ للـوزن النـوعى

(*) **Deep cycle battery** بطاريات مصممة بحيث تفرغ شحنتها بانتظام تفريغًا عميقا (المترجم)

(**) **floating battery** بطارية تقام على عوامات لحماية السواحل (المترجم)

لمحلول كل خلية، فإذا كانت قراءة الهيدرومتر ١,٢٠٠ مثلا فإن فولتية الخليـــة = ١,٢٠٠ + ٠,٨٤ = ٢,٠٤٠ فولت، ويصح هذا فقط إذا لم تكن البطارية تشحن فى خلال تسجيل القراءة، ويبين جدول (٥-٣) العلاقة بين قراءة الهيدرومتر ومستوى شحن البطارية.

جدول (٥ – ٣)

قياس مستوى شحن البطارية

	مستوى الشحن %	قراءة الهيدرومتر	فرق الجهد لكل خلية بالفولت
بطارية (أ)	١٠٠	١,٢٦٠	٢,١٠
	٧٥	١,٢٣٠	٢,٠٧
	٥٠	١,٢٠٠	٢,٠٤
	٢٥	١,١٧٠	٢,٠١
	فارغة تمامًا	١,١١٠	١,٧٥
بطارية (ب)	١٠٠	١,٢٨٠	٢,١٢
	٧٥	١,٢٥٠	٢,٠٩
	٥٠	١,٢٢٠	٢,٠٦
	٢٥	١,١٩٠	٢,٠٣
	فارغة تمامًا	١,١١٠	١,٧٥
بطارية (ج)	١٠٠	١,٣٠٠	٢,١٤
	٧٥	١,٢٧٠	٢,١١
	٥٠	١,٢٤٠	٢,٠٨
	٢٥	١,٢١٠	٢,٠٨
	فارغة تمامًا	١,١١٠	١,٧٥

تصحيح القراءة وفقا لدرجات الحرارة:

ينبغى تصحيح قراءة الهيدرومتر طبقا لدرجة الحرارة، والدرجة المثلى للبطارية هى ٢٥ °م، وتتقلص سعة البطارية إذا تغيرت درجة الحرارة عن ذلك، وباعتبار سعة البطارية ١٠٠% عند درجة ٢٥ °م، فإنها تصل إلى ثلاثة أرباع السعة القصوى عند درجة التجمد، وتزداد سعة البطارية بارتفاع درجة الحرارة. على أننا نحصل على أطول عمر للبطارية وأعظم سعة لها إذا حفظت فى درجة حرارة بين ١٥، ٣٠ °. وعند قراءة للهيدرومتر مقدارها ١,٢٣٠ لا يتجمد المحلول إلا إذا هبطت درجة الحرارة إلى – ٤٠ °م، ويبين جدول (٥ – ٤) درجات تجمد المحلول.

جدول (٥ – ٤)

درجات تجمد المحلول الكهربائى طبقا لقراءة الهيدرومتر

قراءة الهيدرومتر	درجة التجمد °م	قراءة الهيدرومتر	درجة التجمد °م
١,٣٠٠	٧١–	١,٢٤٠	٤٦–
١,٢٨٠	٦٨–	١,٢٣٠	٤٠–
١,٢٧٠	٦٣–	١,٢٢٠	٣٦–
١,٢٦٠	٥٩–	١,٢١٠	٢٥–
١,٢٥٠	٥٣–	١,١١٠	٩–

تأثير إضافة حمض الفسفوريك (يد $_٣$ فو أ $_٤$):

يضاف حمض الفسفوريك بغرض التقليل من تشبع المادة الفعالة بالكبريتات **sulphation** وبصفة خاصة فى حالة تفريغ البطاريات العميق، فقد وجد أن

كبريتات الرصاص (ر كب أ؛) فى وجود كميات ضئيلة من حمـض الفـسفوريك تترسب فى شكل بلورات دقيقة، تتسم بشكل أكثر دقة مما تترسب به فى حالة عـدم وجود حمض الفسفوريك، وتتلخص تأثيرات حمض الفـسفوريك علـى المحلـول الكهربى لخلايا الرصاص الحمضية فى الآتى:

١) يبطئ حمض الفسفوريك من عملية التـشبع بالكبريتـات بعـد التفريـغ العميق.

٢) يحسن حمض الفسفوريك من تكون الرصاص من النوعيـات الرابعـة Pb(IV) على الشحنة وهذه النوعيات قد تسبب زيادة فى تكون عدد من أكاسيد المواد العضوية ذات المظهر الطحلبى **massing**.

٣) تقلل إضافة حمض الفسفوريك من تآكل الرصاص كيميائيًا ومن التفريغ الذاتى.

٤) يقلل الحمض معدل التخلص من المادة الفعالة الموجبة ويزيد من طـول دورة حياة الخلايا الرصاصية الحمضية، وبتحديد أكثر.عمر الأقطـاب الموجبة.

٥) فيما يخص تركيز حمض الفسفوريك فى المحلول الكهربائى، فإنه يسلك سلوكًا معاكسًا لأيونات الكبريتات.

الموقف الحالى لتطور بطاريات الرصاص الحمضية:

بصفة عامة تستعمل بطاريات الرصاص الحمضية مـن النـوع المـستخدم كبادئ للحركة (**starting**) أو للسحب أو من النّوع غير المتحرك، وفى بطاريـات بدء الحركة، يكون معدل التفريغ الذاتى عاليًا للغاية، ولا يوصى باسـتخدامها فـى التطبيقات الكهروضوئية، وبطاريات الجر ذات تفريغ عميق ويسمح فيها بعدد كبير

من الدورات، إلا أن السعر لكل كيلو وات ساعة من الطاقة المختزنة يربو على أربعة أمثال السعر بالنسبة لبطاريات بدء الحركة، وتستعمل البطاريات غير المتحركة فى حالة الحاجة إلى تخزين موسمى للطاقة، ولا تسمح هذه البطاريات إلا بعدد محدود جدًا من الدورات كما أنها باهظة التكاليف.

وقد تم حديثًا تصميم بطارية تصلح بوجه خاص للاستخدامات الكهروضوئية، وهذه البطارية من النوع الرصاصى الحمضى وذات صفيحة مسطحة ولقطبها تصميم خاص ومحتوى منخفض من الأنتيمون، وتتمتع هذه البطاريات بتفريغ ذاتى منخفض للغاية وبمتطلبات صيانة بسيطة وعمر طويل واستهلاك منخفض للمياه، والعمر المتوقع لهذه البطاريات نحو ١٥ سنة، ويسمح تصميمها بالاستخدام فى نطاق الدرجات من -١٠ إلى ٥٥ °م.

وبالإضافة إلى بطاريات الرصاص الحمضية، تتوفر أيضًا بطاريات النيكل – كادميوم، ولهذه البطاريات عمر طويل وعدد كبير من الدورات المسموح بها، كما أنها تتيح استخدام تيارات شحن وتفريغ عالية بما فى ذلك التفريغ العميق، كما أن متطلبات صيانتها قليلة، إلا أنه يعيبها انخفاض كفاءتها مقيسة بالوات ساعة (حوالى ٦٠%) وارتفاع تفريغها الذاتى (١٠ – ٥٠ % شهريًا)، وارتفاع سعر التخزين لكل كيلو وات ساعة، ويمكن اعتبار هذه البطاريات خيارًا طيبًا للتطبيقات التى تحتاج لقوى محركة محدودة.

الباب السادس

طاقة باطن الأرض الحرارية

مقدمة:

تمثل طاقة حرارة باطن الأرض، والتى تستعمل فى توليد الكهرباء منذ أوائل القرن العشرين، مصدرا واسع الانتشار يتواجد فى كل مناطق العالم، ومخزونها – كمصدر للطاقة – بالغ الضخامة. وتفيد التقديرات بأنه إذا تم استغلال احتياطيها الموجود، فمن الممكن توليد طاقة منها تكافئ ما ينتجه ١٢ بليون طن من النفط فى خلال ٢٠ عامًا.

وتتولد طاقة الأرض الحرارية – على الأرجح – من النشاط الإشعاعى لعناصر الثوريوم، والبوتاسيوم واليورانيوم المتناثرة – بانتظام – فى داخل باطن الأرض برمتها، والتى تطلق الحرارة كجزء من عملية اضمحلالها... وتولد هذه العملية حرارة تكفى للاحتفاظ بدرجة حرارة باطن الأرض عند مستوى يقارب ٤٠٠٠ درجة مئوية.

مصادر حرارة باطن الأرض:

تمثل طاقة باطن الأرض الحرارية الضخمة حوالى ٣٥ بليون ضعف استهلاك العالم الراهن الإجمالى من الطاقة... وفى الواقع فإن نسبة ضئيلة من الحرارة الطبيعية يمكن استخلاصها من القشرة الأرضية (وذلك لأسباب اقتصادية أساسًا) مما يحد من إمكانية استغلالها إلى عمق يزيد عن ٥ كيلو مترات كحد أقصى، ولدى هذا العمق تزيد درجة حرارة القشرة الأرضية بمعدل يبلغ متوسطه من ٣٠ إلى ٣٥ درجة مئوية لكل كيلو متر (وهو ما يعرف بمنحدر باطن الأرض

الحرارى)... وبسبب هذا المنحدر الحرارى ترتفع الحرارة الطبيعية – بالتوصيل وبالحمل فى بعض المواضع، متسربة إلى الهواء الجوى لدى بلوغها سطح الأرض، وتنتقل الحرارة بالحمل عادة عندما تسرى الموائع الساخنة (كالماء وبخار الماء والغاز) عند السطح، ولكنه يحدث أيضًا عندما تفيض الحمم البركانية من البراكين النشطة، وتختلف كمية الحرارة المنتقلة بالتوصيل من نقطة إلى أخرى ويبلغ متوسطها من ٦٠ إلى ٦٥ مللى وات لكل متر مربع، وهو ما يقل بآلاف المرات عن متوسط الإشعاع الشمسى الذى يرتطم بسطح الأرض، وبسبب هيمنة الطاقة الشمسية، لا تشعر الكائنات البشرية بالحرارة المتسربة من جوف الأرض بالتوصيل.

ويظهر وجود طاقة باطن الأرض الحرارية فقط فى المواضع التى تتسرب فيها هذه الحرارة إلى الهواء الجوى عن طريق وسط حامل (مائع) مثل المياه الدافئة التى تنبثق من الحمات الحارة أو الينابيع المعدنية أو من خلال انطلاق الغازات الساخنة أو الثورات البركانية.

وتعادل الحرارة المتولدة بالنشاط الإشعاعى لدى اضمحلال العناصر غير المستقرة كاليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم – تلك العناصر التى تتوفر بكثرة فى القشرة الأرضية – تعادل الحرارة المفقودة بالتسرب إلى الهواء الجوى.

وهناك خمس صور لمصادر طاقة باطن الأرض الحرارية: الطاقة المائية الحرارية، تضاغط طبقات الأرض، الصخور الجافة الساخنة، الفوهات البركانية النشطة، والصهارة(*).

(*) الصهارة **magma**: هى المادة المنصهرة تحت سطح الأرض، والتى تتحول إلى حمم **lava** فصخور بركانية عندما تبرد بعد انبثاقها من فوهات البراكين (المترجم)

والمصادر المائية الحرارية تضم الماء الساخن جدًا أو البخار أو كليهما، فى الصخور المتهشمة أو المسامية والمحصورة بين طبقات صخور غير نفاذة، وأفضل أصناف الاحتياطيات (فى درجة حرارة فوق ٢٤٠ درجة مئوية) هى تلك التى تحتوى على البخار مع القليل من الماء المتكثف أو بلا ماء متكثف على الإطلاق (مصادر يغلب عليها البخار)، وبعض احتياطيات الحرارة المائية مرتفعة الحرارة، تتراوح درجة حرارتها ما بين ١٥٠، ٢٠٠ درجة مئوية على أن ثلثيها تقريبًا ذات درجة حرارة معتدلة (١٠٠ إلى ١٨٠ درجة).

وتشمل مصادر الطاقة الأرضية نتيجة التضاغط، المحاليل الملحية ذات درجات الحرارة المتوسطة، والتى تحتوى على الميثان المذاب، وتكون هذا المحاليل محصورة تحت ضغط عال، بين تشكيلات ترسبية عميقة، معزولة بين طبقات غير نفاذة من الطفلة والصخر الطينى.

ويتراوح الضغط ما بين ٥٠٠٠، ٢٠٠٠٠ رطل / للبوصة المربعة(*) على أعماق ما بين ١٥٠٠، ١٥٠٠٠ متر، وتتراوح درجات الحرارة ما بين ٩٠ إلى ما فوق ٢٠٠ درجة مئوية.

وتحتوى مصادر الصخور الجافة الساخنة الصخور ذات درجات الحرارة العالية، والتى تتراوح ما بين ٩٠، ٦٥٠ درجة مئوية والتى قد تكون مهشمة ومحتوية على القليل من الماء أو لا تحتوى عليه.

وينبغى أن تهشم هذه الصخور صناعيًا وأن يتم تدوير الحرارة لكى تستخرج الطاقة منها.

وتتواجد طاقة باطن الأرض فى صورة فوهات البراكين النشطة فى مناطق كثيرة من العالم، والصهارة هى صخور منصهرة فى درجات حرارة ما بين ٧٠٠،

(*) وهو ما يكافئ ٣٤٠ إلى ١٣٦٠ ضغطًا جويًا (المترجم)

١٦٠٠ درجة مئوية، وتمثل جيوب الصهارة مصدرًا ضخمًا للطاقة، بل هى الأضخم على الإطلاق بين مصادر طاقة باطن الأرض، وإن يصعب استخلاص الطاقة منها.

وتنتشر طاقة باطن الأرض فى العالم كله وإن كان انتشارًا غير منتظم وعلى أعماق ضحلة، ويصل مقدار طاقة جوف الأرض التى يمكن – نظريًا – استخلاصها على عمق ٥ كيلو مترات إلى حوالى ١٤٠ x ١٠ ^٢٤^ جول ويحتوى ١٠% من مجمل أراضى العالم على مصادر لطاقة جوف الأرض مما يسهل الوصول إليها، ويوضح الجدول رقم (٦-١) مخزون هذا المصدر لبعض بلدان العالم.

جدول (٦ – ١)

مخزون طاقة باطن الأرض من القدرة الكهربية لمختلف بلدان العالم

البلد	المخزون التقديرى بالميجاوات	البلد	المخزون التقديرى بالميجاوات
الأرجنتين	١٩٩٥٠	كينيا	٧٩٤٥٠
بوليفيا	٦٣١٠٠	كوريا (الشمالية والجنوبية)	٧٩٤٥٠
الكاميرون	١٥١٥٠	المكسيك	٢٥٧٠٥٠
كندا	٤٤٦٧٠٠	المغرب	١٩٩٥٠
شيلى	٣٠٢٠٠	جينيا الجديدة	٣٠٩٠٠
الصين	٥٢٧٠٥٠	نيوزيلندة	٣٠٩٠٠
كولومبيا	٧٧٦٥٠	نيكاراجوا	٣٣٩٠٠
كوستاريكا	١٢٦٠٠	بيرو	٣٠٢٠٠٠

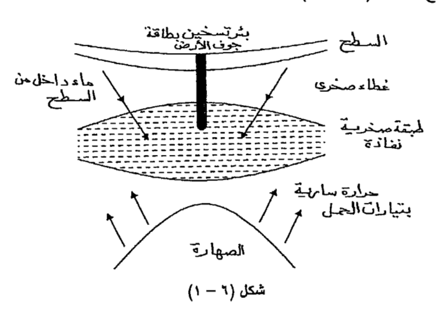
الإكوادور	١٠٠٠٠٠	الفلبين	٦٧٦٠٠
السلفادور	٥٠٠٠	البرتغال	١٠٠٠
أثيوبيا	١٥٤٩٠٠	المملكة العربية السعودية	١٥٨٥٠
اليونان	٨٩٠٠	الاتحاد السوفيتى (سابقًا)	٢٣٩٩٠٠
جواد يلوب	٣٨٧	إسبانيا	٥٩٠٠
هندوراس	١٢٦٠٠	تايوان	٨١٥٠
أيسلاندا	٢٢٩٠٠	تنزانيا	٦٢٠٠
الهند	١٥٢٠٠	تركيا	٨٧١٠٠
إندونيسيا	٤٣٦٥٠٠	الولايات المتحدة الأمريكية	٥٠١٢٠٠
إيران	٧٥٨٥٠	فينزويلا	٣٩٨٠٠
إيطاليا	٣٣٩٠٠	فيتنام	٣٧١٥٠
اليابان	٧٩٤٥٠		

استعمالات طاقة باطن الأرض:

يمكن استعمال حرارة الأرض الداخلية بطريقة مباشرة أو غير مباشرة بتحويل طاقتها الحرارية إلى كهرباء، وكلما ارتفعت درجة حرارة المائع الحامل للحرارة، اتسع مجال التطبيقات العملية، وتشمل التطبيقات المباشرة (مع درجة الحرارة العالية) تقطير المياه، والتبخير على المقياس الصناعى، وهو ما يتطلب تسخينًا حراريًا فى طور بخار الماء، بينما تشمل التطبيقات المباشرة على نطاق درجات الحرارة المنخفضة تسخين الصوبات الزراعية وعمليات التحلل الحيوى التى تتطلب مصدرًا حراريًا فى صورة الماء الساخن، وفى درجات الحرارة الأعلى من ١٧٠ – ١٨٠ درجة مئوية، تستخدم طاقة باطن الأرض فى توليد الكهرباء، وكذلك فى عمليات معالجة لب الخشب لتحويله إلى ورق.

نظم التسخين بالماء عن طريق تيارات الحمل:

يوضح شكل رقم (٦-١) مقطعًا عرضيًا لمنظومة تسخين بالماء عن طريق انتقال حرارة باطن الأرض بالحمل، إذ تترسب المياه السطحية إلى أسفل من خلال تشققات وصدوع فى صخور القشرة الأرضية، ويتم تسخينها فى طبقة صخور نفاذة فوق صهارة ساخنة مترسبة، ويمنع الضغط الهيدروستاتيكى الماء من الغليان، والماء الساخن أقل كثافة من الماء البارد الداخل، ولذا فإنه يميل إلى الصعود لأعلى، ويتكون فوق الصهارة مستودع حرارى ضخم فى صورة ماء ساخن وصخور، وإذا خرج الماء إلى سطح الأرض عن طريق التصدعات الطبيعية فإنه يكون ينابيع ساخنة (أو حمات).



شكل (٦ – ١)

منظومة الاستفادة من طاقة باطن الأرض بالتسخين المائى عن طريق الحمل

ويمكن منع الماء الساخن من الوصول إلى السطح بواسطة غطاء من طبقة صخرية غير نفاذة، ويحصل على القدرة من حرارة باطن الأرض بعمل ثقب خلال

الغطاء الصخرى للوصول إلى الماء الساخن المحفوظ تحت ضغط عال، فإذا كان الماء ساخناً بدرجة كافية فإن هذا كفيل بتوليد البخار عند فوهة الثقب، وهذه هى المنظومة المطبقة حاليًا لاستغلال طاقة باطن الأرض الحرارية.

إن سريان الحرارة عند السطح من المستودع يكون بطيئًا بسبب الغطاء الصخرى غير النفاذ وعلى ذلك ونظرًا للاتزان الحرارى – يكون سريان الحرارة إلى المستودع هو الآخر بطيئًا.

وربما كانت إعادة ملء المستودع حراريًا بطريقة طبيعية، مقارنة بالمعدل الذى يحتمل أن تستخلص به الحرارة من خلال فتحات الثقوب، غير عالية القيمة، وعلى ذلك فهناك حدود للطاقة التى يمكن استخلاصها من المستودع الحرارى لطاقة باطن الأرض.

محطات القوى من طاقة باطن الأرض:

تستغل محطات القوى من طاقة باطن الأرض، البخار المتولد تحت سطح الأرض فى الآبار التى يصل عمقها إلى ١ – ٢ كيلو متر، إن درجة حرارة البخار المتولد فى بئر طاقة جوف الأرض وضغطه يعتمدان على معدل الإنتاج، فكلما زاد معدل سريان البخار، قلت درجة الحرارة وقل الضغط، فى حين يؤدى انخفاض معدل سريانه إلى درجة حرارة أعلى وضغط أكبر.

ومعدل السريان الأمثل هو الذى ينتج أقصى قدرة توليد لمحطة ماء، وعند الينبوع الحار ينتج البخار الجاف عند درجة حرارة ١٧٧ °م تقريبًا وضغط يساوى ٧,٨ ضغطًا جويًا.

وتزال السوائل والمواد الصلبة العالقة من البخار عند رأس البئـر بفـصلها بالطرد المركزى، وعند انبثاق البخار الناجم من طاقة باطن الأرض مـن جهـاز الفصل، يمكنه أن يتمدد فى توربين ثم يطلق مباشرة إلى الجو، وما يغادر التـربين سيكون خليطًا من البخار والسائل الذى يتعين أن يكون ضغطه أعلى من الـضغط الجوى، ويجب أن تكون درجة حرارته أعلى من ١٠٠ درجة مئويـة، إن كفـاءة كارنوت(*) لآلة حرارية تعمل بين درجتى حرارة ١٧٧، ١٠٠ درجة مئوية تبلـغ ١٧% فقط، ويمكن إدخال تحسين ملحوظ إذا خفضت درجة الحرارة لدى المخـرج إلى ٥٠ درجة مئوية، وهذا التخفيض فى درجة حرارة الخروج بمقدار ٥٠ درجـة يفضى إلى رفع كفاءة دورة كارنوت إلى ٢٨%. وتناظر درجة حـرارة خـروج مقدارها ٥٠ درجة مئوية، ضغطًا مقداره ٠,١٢ من الضغط الجوى لمـزيج مـن السائل والبخار، ونحتاج أن يكون الضغط الابتدائى بالمكثف أقـل مـن الـضغط الجوى. وقد استخدمت وحدات التوليد الابتدائية عند الينابيع الحارة مكثفًا بارومتريًا من النوع المبين بشكل (٦-٢)، ويحمل الضغط الجوى المسلط على الماء فى البئر الساخن عمودًا من الماء ارتفاعه (ع) مترًا، والفرق بين الضغط الجوى والـضغط داخل المكثف هو الضغط المطلوب لحمل عمود الماء:

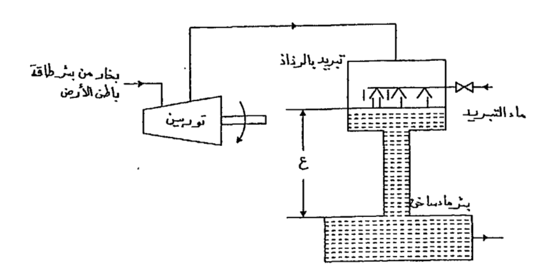
فرق الضغط = ث د ع.

حيث ث = كثافة الماء = ١٠٠٠ كجم / متر٣

، د = عجلة الجاذبية = ٩,٨ م / ث٢

ويتطلب الضغط المناظر داخل المكثف درجة حرارة خروج مـن المكثـف مقدارها ٥٠ ْم، وارتفاعًا قدره ٩ أمتار لعمود الماء، ويتكثـف البخـار بتلامـسه المباشر مع ماء التبريد.

(*) هى آلة حرارية افتراضية تحول الحرارة إلى شغل ميكانيكى (المترجم)



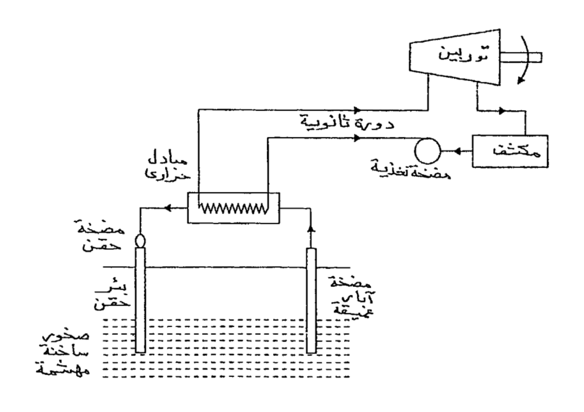
شكل (٦ – ٢)

توربين ومكثف بارومترى

محطة القوى من طاقة باطن الأرض بالمواقع الجافة:

مواقع الأرض الجافة، حيث لا توجد مياه، هى مصدر آخر ممكن لطاقة باطن الأرض الحرارية، ولكى يقوم الماء بدوره كمائع ناقل للحرارة، يلزم حقنه فى الموقع، فبعد الثقب، وتهشيم الموقع الصخرى فى المناطق قرب البئر، يلزم تحسين التلامس الحرارى مع الماء، ويمكن استخدام سلسلة من آبار الحقن تحت ضغط، وآبار الاستخراج لاستخلاص الطاقة الحرارية.

وسنحتاج إلى منظومة ثرموديناميكية مقفلة ثانوية ملائمة كالمرسومة بشكل (٦ – ٣) لإنتاج القدرة الكهربائية، وتعتمد إمكانية استخلاص الطاقة من الموقع الجاف على الدرجة التى يمكن بها تهشيم الموقع.



شكل (٦ – ٣)

رسم تخطيطى لمحطة قوى من طاقة باطن الأرض بموقع جاف

التقدم التكنولوجى:

تستخلص طاقة باطن الأرض الحرارية باستعمال موائع الأرض الطبيعية لاستخراج الطاقة الحرارية، والتى يمكن من خلال توربين استغلالها فى توليد الكهرباء أو استعمالها مباشرة (على سبيل المثال فى التسخين المباشر أو عمليات التسخين خلال العمليات الصناعية).

والاستعمال الأولى لطاقة باطن الأرض هو توليد الكهرباء، ويمكن أن تغذى هذه الكهرباء فى شبكة المرافق العامة أو أن تستخدم – فى موقعها – لإجراء

العمليات الصناعية، وحيث إن طاقة باطن الأرض الحرارية ثابتة، ولا تتعرض لتذبذبات يومية أو فصلية، فإن إدخالها فى شبكة المرافق يستحسن أن يكون ضمن الحمل الأساسى من القدرة الكهربية أو كحمل ذروة قليل التكاليف.

ويمكن استخدام طاقة الأرض فى نطاق درجات الحرارة المعتدلة أو المنخفضة للاستعمالات المنزلية وتسخين المياه، والاستخدامات مثل نظم التدفئة المركزية أو فى تدفئة المبانى السكنية أو البنايات العامة وتزويدها بالمياه الساخنة.

ومن الممكن بالمثل استعمال موائع حرارة جوف الأرض فى إمداد العمليات الصناعية والكيميائية وعمليات الطهى بالحرارة، ويتوقف الاستخدام فى عملية معينة على طبيعتها وعلى مقدار الطاقة الحرارية الجوفية.

آفاق استخدام طاقة باطن الأرض فى الهند:

لقد تمت محاولة تقييم كمية الطاقة الحرارية المختزنة والمتاحة إلى عمق ٣ كم فى ١١٣ موقعًا من مواقع الطاقة الحرارية الأرضية المعروفة بالهند، والتى تتوفر عنها بيانات علمية أساسية، وكان الرقم الذى تم التوصل إليه هو ٤٠,٩ × $١٠^{١٨}$ سعر حرارى، وهو ما يعادل – نظريًا – الطاقة الحرارية التى نحصل عليها بإحراق زهاء ٥٧٣٠ مليون طن من الفحم، أو ٢٨٢٣٠ مليون برميل من النفط، وإذا ما طورت كل هذه المواقع الـ ١١٣ المتعارف عليها كمواقع للطاقة الحرارية الأرضية واستغلت للاستعمالات غير الكهربية، فإن الطاقة المتاحة تكافئ ١٠٦٠٠ ميجاوات.

ولقد حسبت هيئة النفط والغاز الطبيعى ONGC الثروة الكلية من طاقة الأرض الحرارية حتى ٥ كيلو مترات عمقًا وقدرت الحرارة المختزنة والمتاحة بحوالى ٣٢٤٤,٣٥ × $١٠^{٨}$ ميجاوات. سنة، أى نحو $١٠^{٢٤}$ سعر حرارى، وهو ما

يعادل ٧٥٠٠٠٠ بليون برميل نفط، وباعتبار هذا المخزون، والموارد المؤكدة حتى الآن خلال فترة الاستكشاف فقد تم التأكيد على اقتراح بالبدء فـي اسـتغلال هـذه الموارد حيثما توفرت وعلى نطاق صغير، ومن المتوقع العثور على موائـع فـي درجات حرارة ما بين ٦٠، ١٢٠ ° م في مواقع كثيرة بأودية الهيمالايا، وكامبـاي جرابان تاتاباني.

الاعتبارات البيئية:

يؤدي استعمال طاقة الأرض الحرارية – وبالذات للتسخين – إلى انبعاثـات غازية ضئيلة، ورغم أن توليد الكهرباء ذو تأثير أفدح علـى البيئـة ممـا تـسببه الحرارة، فإن تأثير منظومات استغلال طاقة الأرض الحرارية يبقى وسطًا ما بـين تأثير الوقود الأحفوري ومصادر الطاقة المتجددة كالطاقة الشمسية والرياح والطاقة الكهرومائية.

ويمكن تصنيف التداعيات البيئية لاستخدام حرارة الأرض إلى مجمـوعتين: تداعيات مؤقتة ترتبط بعمليات الحفر والاستغلال، وأخرى دائمة ناجمة عن صيانة الآبار والحفر التعويضي وتشغيل محطات القوى، وتتضمن آثار تشغيل المحطـات تلك الآثار مثل شغل الأراضي وتشويه البيئة النباتية جماليًا، بما في ذلـك – فـي بعض الأحيان أبراج التبريد، والضوضاء ونفث الغازات الملوثة (يد ٢ كب، ك أ ٢ والرادون وغيرها) والعناصر السامة (الزئبق والزرنيخ) في الجو، عـلاوة علـى النفايات الصلبة وبقايا المياه المطرودة.

يمكن على أية حال الحد من كـل هـذه التـداعيات باتخـاذ الإجـراءات الاحترازية الملائمة، فالجور على الأراضي يمكن تحجيمه بحفر عدة آبار موجهـة

directional[*] من موقع واحد، ويمكن بالتصميم المعمارى الجميل التغلب على تشوه البيئة المحتمل، كما يمكن بالتصميم الملائم الحد من ضوضاء الآلات والبخار.

وتلوث الهواء هو الهم الأكبر المرتبط باستغلال طاقة حرارة الأرض، فلأسباب فنية واقتصادية يتعذر إعادة حقن الغازات التى تنبعث خلال توليد القوى ثانية فى المستودع، ورغم أن طرقًا قد اتبعت فى بعض الأحيان للتقليص من غاز كبريتيد الهيدروجين (من الينابيع الحارة) إلا أنها يعيبها أن الكيماويات السامة التى تستعمل فى عمليات التقليص هذه لابد وأن تنقل بعيدًا كما ينبغى التخلص من الكبريت الصلب بأسلوب صحيح.

ولا تمثل الملوثات الغازية الأخرى بطبيعتها مشكلة ضخمة، فالمواد الأخرى كالرادون والزئبق والزرنيخ وغيرها لا توجد إلا بنسب طفيفة، ولا تؤثر – عمليا – فى درجة نقاء الهواء.

وتتراكم النفايات الصلبة عندما تترسب المواد من موائع باطن الأرض ومن مصانع معالجة كبريتيد الهيدروجين. ورغم أن المخلفات تكون أحيانًا سامة، فإن كمياتها متواضعة، ويمكن تقليلها – إن لم يكن استئصالها كلية – بالتعامل المرشد معها.

ورغم أن استغلال طاقة الأرض الحرارية يطرح قضايا بيئية متعددة، فإن الكثير من هذه القضايا يمكن التصدى لها بتقنيات التحكم الملائمة، بما يجعل استغلال طاقة حرارة الأرض فى توافق مع البيئة التى تقام عليها مشروعاتها، وعلاوة على ذلك، يخلق استعمال طاقة الأرض الحرارية تلوثًا أقل فى الهواء والماء ومخلفات ذات أضرار أقل، سواء فى توليد القوى المحركة أو – وحتى بدرجة أعلى – فى التطبيقات المباشرة.

(*) هو حقل نفط تنحرف فيه ماسورة الحفر عن الوضع الرأسى (المترجم)

الباب السابع

مولدات القوى المغناطيسية – الهيدروديناميكية (م هـ د)

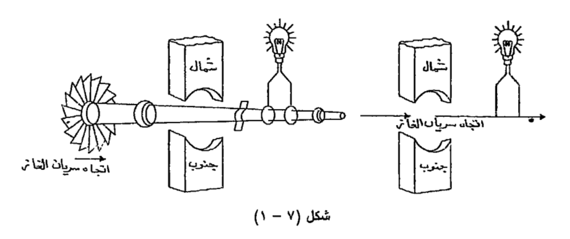
مقدمة:

فى مولدات القوى من النوع المغناطيسى – الهيدروديناميكى، يحل تيار من غاز متأين ساخن، محل الجزء النحاسى الدوار من المولد التوربينى التقليدى (شكل ٧ – ١) وفى كلا الحالين يدفع موصل جيد للكهرباء للتحرك خلال مجال مغناطيسى، مولدًا – بالتبعية – مجالاً كهربائيًا فى الموصل، وحينئذ يمكن استخلاص القدرة من المجال الكهربائى المتولد بعديد الطرق.

وحيث إن الطاقة الحركية فى تيار الغاز تتحول بشكل مباشر إلى طاقة كهربية، فإن مولد القوى من النوع المغناطيسى – الهيدروديناميكى هو جهاز بسيط، أبسط من مثيله التقليدى.

وتتركز معظم التجهيزات الحالية لتوليد الكهرباء فى تحويل الطاقة الحرارية فى الغاز إلى طاقة كهربية، والعلة فى هذا تكمن فى أن للغاز – كموصل – عددًا من المميزات كمادة عاملة.

فى ثلاثينيات القرن العشرين بدأ لانجموير **Langmuir** استعمال تعبير "البلازما" فى وصف الغازات المتأنية، وتبدو لمثل هذه الغازات خواص شبيهة بتلك التى للمعادن وأشباه الموصلات والمحاليل الإلكتروليتية القوية والغازات المعتادة، وذلك اعتمادًا على درجة تأين الغاز، فالبلازما هى غاز متأين، تتأثر خواصه تأثرًا كبيرًا بوجود جسيمات مشحونة، وبصفة خاصة خواصه الكهربية، والبلازما محايدة – كهربيًا – فيما عدا على النطاقات الميكروسكوبية.



شكل (٧ – ١)

مقارنة بين المولد التربينى التقليدى ومولد القدرة المغناطيسية الهيدروديناميكية

تأيين الغاز:

التأين هو عملية ماصة للحرارة حيث ينتزع إلكترون أو أكثر من ذرة ما.

ويمكن أن تقسم آليات التأين – على نطاق واسع – إلى ثلاث فئات:

عمليات تأين حرارى، وهى التى تحصل كنتيجة للارتطام بين الجسيمات المستثارة التى يتركب منها الغاز.

والتأين الناجم عن تعرض الغاز لجسيمات ذات طاقة عالية.

والتأين التراكمى المسمى أحيانًا بالتأين على مراحل.

سنتعرض الآن للخطوات المتعددة التى قد تحدث فى حالة التأين الحرارى لغاز يحتوى الجزىء منه على ذرتين، فلنعتبر الغاز وهو فى درجة حرارة تقارب درجة الصفر المطلق، ولنتصور جزىء هذا الغاز فى هيئة دمبل(*)، أو جسم جاسئ دوار (كما فى شكل ٧ – ٢)، واعتمادا على مدى قرب درجة الحرارة من

(*) ثقل مكون من قضيب قصير مع كرة أو قرص فى كل طرف، يرفع كوسيلة لتقوية العضلات (المترجم)

درجة الصفر المطلق، ستتمكن الجزيئات من الانخراط فى حركة انتقاليــة فـــى أى اتجاه، وبارتفاع طفيف فى درجة الحرارة يبدأ الدمبل فى الدوران مبديًا ٣ درجـــات أعلى من الحرية.

ولا تبدأ درجة الحرية التذبذبية حتى ترتفع درجة الحرارة إلى ١٠٠٠ ° كلفن (انظر شكل ٧ – ٣) وبارتفاع درجة الحرارة تتضمن ارتطامات الجزيئـــات مـــن الطاقة ما يكفى لتحطيم القوى الرابطة بين الذرتين، مما يفضى إلى انحلالها كما فى شكل (٧ – ٤)، وفى ظروف الضغط الجوى، يبدأ الأكسجين فى التحلل عند درجة ٣٠٠٠ ° كلفن تقريبًا، فى حين يبدأ تحلل النيتروجين عنـــد درجـــة ٤٥٠٠ ° كلفـــن تقريبًا، ويمكن التعبير عن تحلل الأكسجين بالمعادلة:

$$أ_٢ + ط_ح \longrightarrow ٢أ$$

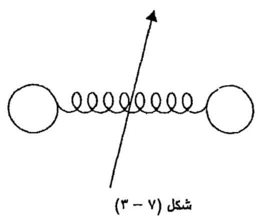
ويعبر عن طاقة التحلل ($ط_ح$) غالبًا بوحدات الإلكترون. فولت لكل جزىء، وإذا استمررنا فى رفع درجة الحرارة فإن الإلكترونات فى مداراتها حـــول نـــواة الذرة تصبح متهيجة إلى حالات كمومية فـــوق الحالـــة الأرضـــية **ground state** ويسهم هذا النوع من الاهتياج فى كمية الطاقة الكلية، غير أنه من المفترض إهمال تأثيره حتى درجة ٥٠٠٠ ° كلفن، وإذا ما رفعت درجة حرارة الغاز إلى مـــا فـــوق حالة الانحلال فإن الغاز يتأين (كما فى شكل ٧ – ٥) فيغادر الإلكترون الـــذرة، مما يحولها إلى أيون ذى شحنة موجبة، وحالة تأين ذرة مفردة من الأكسجين يعبر عنها بالمعادلة:

$$أ + ط_ت \longrightarrow أ^+ + إلكترون.$$

حيث $ط_ت$ هى طاقة التأين فى الذرة مقدرة بوحدات الإلكترون فولت لكـــل ذرة.

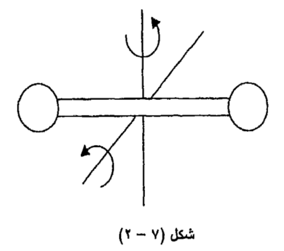
وبذلك تكون طاقة التأين (أو مستوى التأين) هى الطاقة المبذولة فى إزاحة إلكترون ما من مداره الذرى حول النواة وإحالته إلى حالة السكون على مسافة لا متناهية من نواة الذرة.

وبتخفيض الضغط المسلط على الغاز يمكن تخفيض درجة الحرارة التى يتأين عندها.



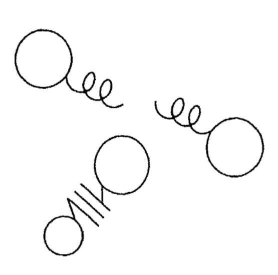
شكل (٧ – ٣)

جزىء ثنائى الذرات له ثلاث درجات من حرية الحركة: انتقالية ودورانية وتذبذبية



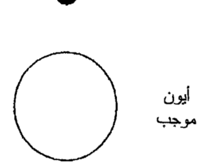
شكل (٧ – ٢)

جسم جاسئ دوار له درجتان من حرية الحركة: حركة انتقالية وحركة دورانية



شكل (٧ – ٤)

انحلال الجزىء إلى ذرات متعادلة (محايدة)



شكل (٧ – ٥)

الذرة المتأينة

أساليب تأيين الغاز:

من بين الثلاثة مستويات لتأيين الغاز التى سبق الإشارة إليها، فإن أهمها – فى تصميم مولدات القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية – هى تلك التى تتضمن ارتطامات ما بين مكونات الغاز الساخن.

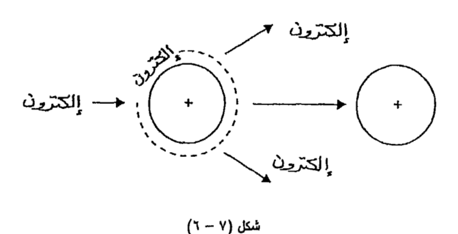
وفى حالة تأين الإلكترونات التصادمى (عن طريق التصادم)، تتولد الطاقة عندما يرتطم إلكترون بذرة من الغاز منتزعًا إلكترونًا آخر من تلك الذرة، وتلعب فكرة مساحة المقطع دورًا جوهريًا فى دراسة التأين، ومصطلح (مساحة مقطع التأين) هو مقياس لاحتمال أن تؤين إلكترونات ذات طاقة معينة، ذرة بعينها، وبصفة عامة فمساحة المقطع دالة فى طاقة الإلكترون المصطدم وحالة الطاقة التى عليها الذرة المتأينة، وإذا أحدث اصطدام واحد التأين لذرة ما، فينبغى أن تكون طاقة الإلكترون الصادم مساوية – على الأقل – لطاقة تأين الذرة، وهذه القيمة هى الحد الأدنى من مستوى الطاقة للتأيين، وإذا كان للإلكترون المصطدم طاقة تتجاوز ذلك الحد الأدنى اللازم لذلك فقد تحتجز الطاقة الفائضة فى الإلكترون، متحولة فى شكل إلكترون يتحرر خلال عملية التأين، أو يستعمل فى استثارة (أو تأيين) أكثر للذرة، وهناك صورة أخرى للتأين عن طريق الاصطدام، تسمى بالتأين الحرارى.

ويحدث التأين الحرارى عندما تكون طاقة الحركة المتوسطة للجزيئات مرتفعة بما يكفى كى تكفل الطاقة المتحولة خلال اصطدام بين جزيئين محايدين عديمى الشحنة، تأين أحدهما، ويمكن أن يقع هذا عند درجات الحرارة بالغة الارتفاع.

المولد المغناطيسى الهيدروديناميكى:

فى المولد المغناطيسى الهيدروديناميكى، يقوم غاز متأين (أو بلازما) ذو سرعة عالية بدور الموصل المتحرك، وحيث إن الغاز هو نتاج مباشر

للاحتراق، فيمكن الاستغناء عن الوصلة الميكانيكية فى صورة عمود دوار. وفــى درجات الحرارة العالية سيكون لدى بعض الإلكترونات الحرة بالغاز طاقة الحركة التى تكفى لتأيين ذرة محايدة من خلال الاصــطدام (شــكل ٧ – ٦)، ولمكونــات الاحتراق فى الظروف الطبيعية، تحتاج طاقة الإلكتــرون (١/٢ ك ع٢) للوصــول إلى ما يتراوح ما بين ١٢، ١٥ إلكترون فولت لإحداث التأين، ولسوء الحظ فحتى عند درجة ٢٥٠٠ – ٣٠٠٠ ْم لا يكفى التأين الحادث لإفراز مولــد ذى جــدوى ويقتضى هذا حقن جزيئات ذات طاقة تأيين أقل، مثل البوتاسيوم أو السيزيوم، وهى العملية المسماة بالبذار **seeding**.



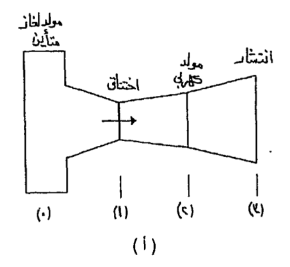
شكل (٧ – ٦)

إلكترون يحدث تأينا اصطداميًا

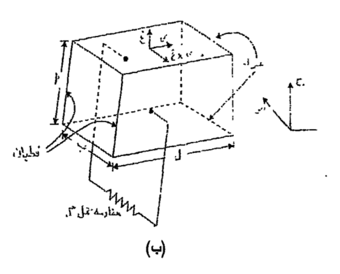
ويبين شكل (٧ – ٧) رسمًا تخطيطيًا للمولد بغرض تحليل وظيفته، وللمولد لدى المدخل مجرى ذو عرض ب وارتفاع أ، وبتثبيت السرعة فى اتجاه المحــور لدى قيمة ثابتة، تستخلص الطاقة الكهربية فقط من طاقة الغاز الحرارية، ويمكننــا اعتبار ذلك عملية على مرحلتين، فحث فاراداى(*) ينزع الطاقة الكهربية فقط مــن

(*) حث فاراداى أو الحث الكهرومغناطيسى هو إنتاج فرق جهد عبر موصل كهربــى واقــع فــى مجــال مغناطيسى متغير (المترجم)

طاقة الحركة للانسياب حينما يقطع الغاز الموصل خطوط القــوى المغناطيــسية، وعلى أية حال، فسرعان ما يستعيد الغــاز ســرعته، علـــى أن درجـــة الحـــرارة الإستاتيكية تهبط.



(أ)



(ب)

شكل (٧ – ٧)

(٧ – ٧ أ) شكل تخطيطي لمولد غاز، واختناق، ومولد كهربي ثم منظومة انتشار

(٧ – ٧ ب) المولد الكهربي ونظام الإحداثيات

سنضع الافتراضات التالية فى تحليلنا:

١) الغاز يسرى داخل المولد بمعدل ثابت عند الموضع (١) فى الاتجاه الموجب لزيادة البعد (س) بسرعة $ر_١$ وضغط $ض_١$ ودرجة حرارة $د_١$.

٢) افتراض وجود فيض مغناطيسى منتظم كثافته غ فى الاتجاه الموجب للإحداثى (ع)، والجدران لدى القيمة ع= ± $\frac{أ}{٢}$ من مادة عازلة، والجدران لدى القيمة ص = ± $\frac{ب}{٢}$ من مادة موصلة تستخدم كأقطاب تجمع التيار وتوجهه نحو الحمل الخارجى م.

٣) خواص الوسط فى الحالة الغازية وسرعة سريان الغاز جميعها متجانسة عبر أى مقطع.

٤) يفترض أن المائع غاز مثالى (عديم الاحتكاك وذو انضغاطية مثالية **compressibility**).

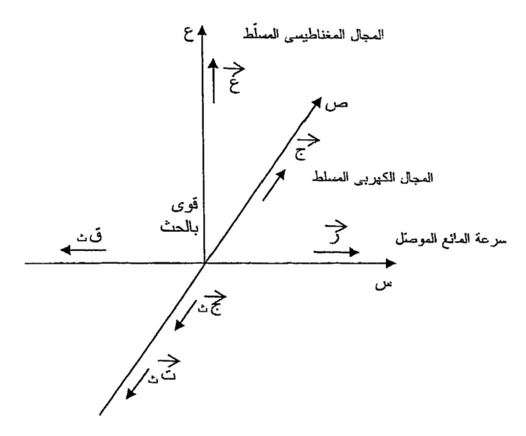
٥) تهمل الاضطرابات التى يحدثها التيار فى المجال المغناطيسى المسلط.

٦) تهمل التيارات المتسربة من أطراف الأقطاب.

٧) التوصيلية الكهربية مقدار مقياسى (غير متجه) **scalar**، قيمته تحددها درجة الحرارة والضغط المتوسطان فى مجرى المولد.

٨) يهمل انتقال الحرارة من المجرى.

٩) نظام الإحداثيات المستخدم لتوصيف الظاهرة الحادثة فى المولد موضح بشكل (٧- ٨). سنفترض مائعا ذا توصيلية كهربية سرعته رفى اتجاه س الموجب، ومجالا مغناطيسيا كثافة فيضه $\overleftarrow{غ}$ فى اتجاه عمودى عليه (اتجاه ع الموجب). والتفاعل ما بين مجال السرعة، والمجال المغناطيسى يولد مجالا كهربيا بالحث $\overleftarrow{ج}_ث$ متعامدا مع كل من المتجهين ر،غ. ويعطى مقدار هذا المجال بحاصل الضرب الاتجاهى $\overleftarrow{ج}_ث = \overleftarrow{ر} \times \overleftarrow{غ}$



شكل (٧ – ٨)

نظام الإحداثيات المطبق

وحيث إننا قد افترضنا أن التوصيلية مقدار مقياسى لا اتجاهى، فمن الممكن ربط كثافة تيار الحث بمجال الحث بالعلاقة $\overleftarrow{ت_{ث}} = \sigma\ \overleftarrow{ج_{ث}}$

وفى نفس الوقت يتفاعل تيار الحث مع المجال المغناطيسى فتتولد بالحث قـوة لورينتس(*) **lorentz force** تعطى بحاصل الضرب الاتجاهى $\overleftarrow{ق_{ث}} = \overleftarrow{ت_{ث}} \times \overleftarrow{غ}$

(*) قوة لورينتس: هى القوة المؤثرة على شحنة من جراء مجال كهرومغناطيسى، وهى دالـة فـى قيمـة الشحنة وشدة المجالين الكهربى والمغناطيسى وسرعة الجسيم. (المترجم)

وهى نفس القوة التى تحدث فى مولد كهربى عندما يقطع تيار الحث فى الجزء الدوار **armature** خطوط مجال المولد، والقوة المنتجة بالحث عمودية على كل من ت ث، غ وطبقًا لقاعدة اليد اليسرى تكون هذه القوة موازية للسرعة ر، إلا أنها فى عكس اتجاهها.

وعلى وجه العموم فإننا الآن نسلط مجالاً كهربيا ج عموديا على كل من المجال المغناطيسى غ والسرعة ر ، ولكن فى عكس اتجاه كثافة تيار الحث ت ث، وكثافة التيار الصافية (المحصلة) ت المار خلال المائع الموصل، وهى التى يقيسها لنا جهاز أميرومتر واصل بالدائرة هى ت = σ (ج + ر × غ) = σ (ج + ج ث) = σ ج

وقوة لورينتز الفعالة نتيجة التيارين = ق = ت × غ = σ (ج + ر × غ) × غ

ويلاحظ أنه إذا كان المجال الكهربى المسلط ج يزيد عن المجال الكهربى المتولد بالحث ر × غ فسينجم تسارع قد يستعمل كأداة تولد دفعًا، فإذا عسكت قطبية الفولتية المسلطة، فإن قوة لورينتز ستتأخر عن السريان (التيار).

المشاكل المواكبة لتوليد القدرة عن طريق الهيدروديناميكية المغناطيسية:

١ - **زيادة التوصيلية الكهربية عن طريق البذار: seeding** تتعدد طرق تأيين الغازات كى تصبح موصلة كهربيًا إلى المدى الذى يتيح استعمالها فى المولد الهيدروديناميكى المغناطيسى، ويلوح أن أجدى الطرق لذلك حتى الآن هو استعمال مادة سهلة التأين كأحد المعادن القلوية، تمدنا بالتوصيلية اللازمة فى محطة قوى مغلقة الدائرة حيث بالمقدور إعادة واسترجاع مادة البذار.

وأحد العوامل التى يجب أخذها فى الحسبان عند استعمال مادة بذار هو التأثير المحتمل الضار بالصحة الذى قد تحدثه المعادن القلوية على

مكونات المولد التى قد تتلامس معها، ومن المحتمل جدًا أن تسبب تلـك المادة زيادة فى تآكل أجزاء المولد كيميائيًا.

٢ – **المواد الصامدة للحرارة:** العثور على المواد التى تـستطيع الـصمود لدرجات حرارة تشغيل مثل هذه المولدات المرتفعة، يمثل مشكلة رئيسية فى تصميم مولدات مغناطيسية هيدروديناميكية ذات عمر طويل، وهـى مشكلة تتجلى خطورتها عندما تأخذ فى الاعتبـار أن المـواد العازلـة والمواد الموصلة التى تصمد لدرجات حرارة من ٢٠٠٠ إلـى ٣٢٠٠ درجة كلفن لازمتان كلتاهما لفترات طويلة فى جو قد يحتـوى أبخـرة المعدن القلوى المستعمل فى رفع توصيلية الغاز.

ويبدو أن التنجستن والتنتاليوم هما أكثر المـواد صـلاحية للاسـتخدام كأقطاب فى المولدات ذات الغازات الخاملة، علـى افتـراض أنهـا لا تتفاعل مع المعادن القلوية، وأنها تتوافق مع مـواد العـزل الكهربـى المستعملة فى منطقة المجرى.

٣) **مشاكل انتقال الحرارة:** يمكن تقليل المشاكل الخاصة بنوعية التصنيع إلى حد ما بتبريد الجدران، على أن هناك أمرًا واحدًا يحد من هذه العمليـة، فلا ينبغى تبريد الأقطاب إلى الحد الذى تعود معه الإلكترونـات إلـى الاندماج مع الأيونات المتواجدة على مقربة منهـا، وبالتـالى تـتقلص التوصيلية الفعالة للغاز، وليس هناك حدود بالنسبة لمدى تبريد الجدران العازلة، إلا أن التبريد يجب – فى جميع الأحوال – ألا يخفض درجـة حرارة الباطن **bulk** بأكثر من أجزاء قليلة من المائة.

٤) **الفواقد المغناطيـسية:** إن القوى المحركة فـى مولـد هيـدروديناميكى مغناطيسى اللازمة للمجال المغناطيسى قد تصل إلى جزء ملموس مـن

القوى المولدة، ويمكننا أن نعتبر حالة مغناطيس كهربى ذى قلب هوائى، وآخر ذى قلب حديدى أو مغناطيس من مادة ملائمة لدرجات الحرارة شديدة الانخفاض وذات توصيلية فائقة.

ويقدم المغناطيس ذو التوصيلية الفائقة ميزتين رئيسيتين مقارنة بالمجال المغناطيسى الذى يولده مغناطيس لفاته من النحاس الأحمر. فالقدرة على حمل التيار للموصلات الفائقة المتوفرة الآن... أولا تربو بكثير عما يمكن الوصول إليه من النحاس الأحمر بحوالى مائة مرة، وعلى ذلك يمكن تقليل حجم اللفات بدرجة ملموسة، وثانيًا: حيث إن الموصل الفائق ذو مقاومة كهربية تصل إلى الصفر، فلا توجد فواقد جولية Joule losses حرارية فى المغناطيس، والقدرة اللازمة لتوليد المجال تقل بعدة مرات.

٥) **توليد القدرة بتيار متردد:** لتوزيع القدرة بكفاءة، يلزم تيار متردد، ومن نقاط البحث الطريفة إمكانية توليد تيار متردد رأسًا فى قناة الجهاز الهيدروديناميكى المغناطيسى، وتجرى الآن بحوث على ما يسمى بأجهزة التوزيع غير ذات الأقطاب.

الباب الثامن

الخلية الوقودية

مقدمة:

تتجنب خلية الوقود عملية الاحتراق فى درجـات الحـرارة العاليـة، ومـا يستتبعها من عمليات تجرى فى كل أساليب تحويل الطاقة تقريبًا، والتـى تـصمم لتوليد الطاقة الكهربية.

وبواسطة خلية الوقود من الممكن تجنب التحول إلى عملية التـسخين ومـا يصاحبها من عمليات ميكانيكية وكهربية، ففى خلية الوقود تتحول الطاقة الكيميائية بالوقود مباشرة وبكفاءة إلى طاقة كهربية (بجهد كهربى مـنخفض وتيـار ثابـت) وبذلك نتحاشى الكثير من الملوثات التى تتكون عادة فى درجات الحرارة العاليـة، وتوصف خلية الوقود أحيانًا كبطارية أولية يخزن فيها الوقود والمـادة المؤكـسدة خارج البطارية بحيث يمكن تغذيتهما حسب الحاجة.

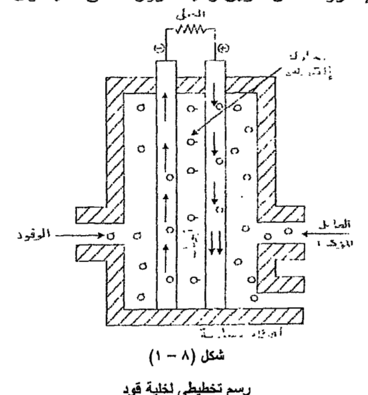
وكميزة فى هذه الترتيبة يمكن أن يتم التحول – على الأقـل مـن الناحيـة النظرية – عند درجة حرارة ثابتة، وبالتالى فلا تنطبق محددات كارنوت التى تحـد من الكفاءة.

وقد استعملت خلية الوقود من نوع الهيدروجين – الأكسجين، وهـى أكثـر الأنواع تطورًا بتوسع فى تطبيقات الفضاء، وفى هذه الخلايا يتم تخزين الطاقة فـى هيئة هيدروجين وأكسجين سائلين، ينتجان – عند اندماجهما فى خليـة الوقـود – طاقة كهربية، وتستخدم خلايا الوقود الهيدروكربونية فـى التطبيقـات الأرضـية، ويعود مفهوم الخلية الوقودية إلى السير ويليام جروف (١٨٣٩)، وفى عـام ١٩٣٢ عرض فرانسيس توماس بيكون خلية وقود تعمل بالهيدروجين والأكسجين.

وفى خلال عقد الخمسينيات من القرن العشرين تم تطوير العديد من خلايـا الوقود القادرة على إنتاج مستويات عالية من القدرة.

تركيب الخلية الوقودية:

يوضح شكل (٨ – ١) العناصر التى تتكون منها الخلية الوقوديـــة، حيــث ينتشر غاز الوقود خلال المصعد **anode** ويتأكسد، ومن ثم يطلق إلكترونـــات إلـــى الدوائر الخارجية، وينتشر المؤكسد خلال المهبط **cathode** فتختزله الإلكترونـــات القادمة من المصعد عن طريق الدائرة الخارجية، والمبدأ الذى يقوم عليه أى تفاعل احتراق، سواء فى خلية وقود أو آلة حرارية، واحد، حيث يتضمن تفاعل الاحتراق انتقال إلكترونات من جزيئات الوقود (ومن ثم تأكسدها) إلى جزيئات المؤكسد التى يتم اختزالها، وفى الآلات الحرارية تمتزج جزيئات الوقود والمؤكسد امتزاجًا كاملا بحيث تنتقل الإلكترونات رأسًا من جزيئات الوقود إلى جزيئات المؤكسد، أما خليـــة الوقود فهى جهاز يحفظ جزيئات الوقود بعيدًا عن الامتزاج بجزيئـــات المؤكـــسد، متيحًا انتقال الإلكترونات عن طريق وسيط مرور معدنى قد يحتوى حملا ما.



شكل (٨ – ١)

رسم تخطيطى لخلية قود

تضم خلية الوقود قطبين موصلين كهروكيميائيا، يفصل بينهما محلول كهربى(*) electrolyte، ويغذى الوقود خارج القطبين، فى حين يغذى الهواء أو الأكسجين خارج الطرف الآخر، وعند توصيل القطبين معًا وسريان التيار الكهربى يستهلك كل من الوقود والوسط المؤكسد، فى حين لا يستهلك القطبان خلال هذه العملية، وتمضى خلية الوقود فى توليد القدرة الكهربية طالما استمر تزويدها بالوقود وبالعامل المؤكسد حول القطبين،وطالما استمرت عملية إزالة نواتج التفاعل.

ومن الممكن أن تتجاوز الكفاءة الحرارية النظرية لخلايا الوقود نسبة ٩٥%، أما من الناحية العملية فالأرجح أن تتراوح ما بين ٣٠، ٦٠ %، ويعزى هذا الفقدان فى الكفاءة إلى عدم قابلية العمليتين لدى القطبين للانعكاسية(**)، وإلى ارتفاع استهلاكات منظومات التحكم والمنظومات المساعدة من الطاقة.

وتحتفظ خلايا الوقود بكفاءتها التشغيلية عبر مدى واسع من التغيرات فى الحمل، ويقل استهلاكها للوقود فى وقت عدم تشغيلها بكثير عن استهلاك معدات التوليد التقليدية الأخرى، ومن هنا كانت ذات أفضلية فى الأداء لدى الأحمال المنخفضة، وهو ما يزيد كثيرًا من تنوع مجالات استعمالها.

بعض القواعد الكهروكيميائية:

تعمل خلايا الوقود طبقا للقواعد الكهروكيميائية، وسنستعرض فيما يلى تلك الأفكار الضرورية لاستيعاب عمل خلية الوقود.

(*) المحلول الكهربائى electrolyte : هو مركب كيميائى يتأين عندما يتحلل ويصبح وسيطًا موصلاً للكهرباء (المترجم)

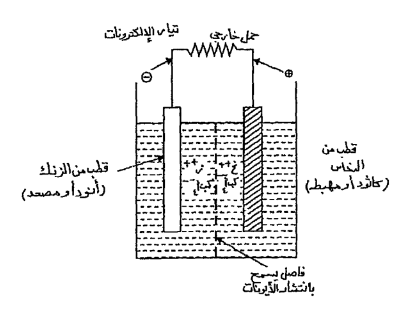
(**) عدم الانعكاسية non – reversibility تعنى عدم تحويل العملية (كالتفاعل الكيميائى مثلا) لتجرى فى الاتجاه المضاد (المترجم)

سنبحث أولا خلية دانييل أو عمــود دانييــل **Daniell cell** (شــكل ٨ – ٢)، والتى تتركب من إناء مقسم إلى جزأين بواسطة حائل يسمح بترسب الأيونات فيما بينهما، ويحتوى القسم الأيسر على محلول من كبريتــات الزنــك، وتــتم الــدائرة بالتوصيل بين القطبين بسلك يمكنه إمرار التيار الكهربى عبر حمل خارجى.

ويطلق لفظ المصعد **anode** على القطب الذى يحدث لديه التأكسد (ويعنــى التأكسد فى حالتنا هذه فقدان الإلكترونات) فالإلكترونات لدى المصعد حرة فــى أن تغادره وتسرى خلال التيار الخارجى، أما المهبط **cathode** فهــو القطــب الــذى يحصل لديه الاختزال، فالكاثورد يتلقى الإلكترونات من الدائرة الخارجية ،.

والإلكترونات التى تصل إلى المهبط تحتبس هناك بالتفاعل مــع أيونــات النحاس (نح$^{++}$) وتشارك فيه:

نح$^{++}$ + ٢ إلكترون$^{-}$ ⟵ نح (صلب) (٨–١)



شكل (٨ – ٢)

خلية دانييل

تقصى أيونات النحاس من المحلول عند المهبط، وتدخل أيونات الزنك فـــى المحلول من المصعد، والأيونات الموجبة (ز$^{++}$)، (نح$^{++}$) فى المحلول تتحرك نحــو المهبط فى حين تتحرك أيونات الكبريتات السالبة صوب المصعد، والإلكترونـــات التى تغادر المصعد تتحرر طبقًا للتفاعل.

ز (صلب) ⟵ ز $^{++}$ + ٢ إلكترون$^{-}$ (٨-٢)

ومن دمج التفاعلين لدى المصعد والمهبط نحصل على

ز (صلب) + نح $^{++}$ ⟵ ز $^{++}$ + نح (صلب) (٨-٣)

ومن الملاحظ – طبقا للمعادلة (٨-١) أن مرور ٢ مول مـــن الإلكترونـــات عبر الخلية ينتج ١ مول من النحاس الذى يترسب كطبقة طلاء، ١ مول من أيونات الزنك (طبقا للمعادلة ٨ – ٢)، والجرام. مول مـــن الإلكترونـــات يحـــوى عـــدد أفوجادرو ($٦,٠٢ \times ١٠^{٢٣}$) من الإلكترونات، وله شحنة كليـــة قـــدرها ٩٦٤٩٣ كولوم، وعلى ذلك فإن السلك الذى يحمل تيارًا شدته ١ أمبير لمدة ٩٦٤٩٣ ثانيـــة سيمرر ١ مول من الإلكترونات أو شحنة مقدارها ٩٦٤٩٣ كولوم، والشحنة التـــى تساوى عدد أفوجادرو من الإلكترونات تسمى بالفاراداى ويرمز لها بالرمز (ف).

فإذا ما افترضنا أن الصورة الوحيدة من الشغل النافع فـــى منظومتنـــا هـــى الشغل الكهربى، فإن الشغل الكهربى الذى تبذله الخلية يعطى بمقدار الشحنة التـــى تسرى منها مضروبًا فى القوة الدافعة التى تسبب سريانها، وبعبارة أخـــرى فـــرق الجهد الكهربى بين قطبى الخلية، ويعطى مقدار الشحنة كحاصـــل ضـــرب عـــدد الإلكترونات مقدرًا بالمول، والتى تشارك فى التفاعل، مضروبًا فى عـــدد وحـــدات الكولوم لكل مول من الإلكترونات، أى أن:

الشغل الكهربى = ن ق ف

حيث تمثل ن عدد الإلكترونات بالمول، وينبغى أن يكون فـرق الجهـد ف معكوس فرق جهد الخلية، وهو فرق الجهد مقيسًا فى ظروف الدائرة المفتوحة.

كفاءة خلية الوقود:

تتكون خلية الوقود من قطبين موصلين خارجيًا بدوائر معدنية، حيث يجـب أن تمر إلكترونات التكافؤ من قطب (أو إلكترود) الوقود، وداخليًا بوسيط موصـل للكهرباء (المحلول الإلكتروليتى) الذى تسرى خلاله الأيونـات لتكتمـل الـدائرة، والمعادلة الكيميائية التى تصف هذا التفاعل هى:

وقود + مادة مؤكسدة = نواتج تفاعل.

والتفاعل الحاصل عند القطبين يمثل بالمعادلتين:

وقود = أيونات + إلكترونات (عند المصعد)

مادة مؤكسدة + إلكترونات = أيونات (عند المهبط)

والقوة الدافعة الكهربية التى ستدفع الإلكترونات التى تتحرر لـدى المـصعد للمرور خلال الحمل الخارجى، تتناسب مع التغيـر فى طاقـة جيبـس الحـرة **Gibbs free energy**.

وتعرف الطاقة الحرة لجيبس Δ ج بالمعادلة:

Δ ج = Δ ل – د Δ ر كيلو سعر / مول

حيث Δ ل هو التغير فى الإنثالبيا فى أثناء التفاعل (غالبًا ما تسمى بحـرارة التفاعل أو حرارة الاحتراق)، Δ ر هو التغير فى الإنتروبيا للعملية، فـإذا كانـت العملية انعكاسية (قابلة للعكس)، فالمقدار (د Δ ر) يمثل مقدار الحرارة المنتقلة عند درجة حرارة ثابتة، ويعرف مقدار فرق الجهد الدافع بالمعادلة:

$$\Delta ج = - ن ق ف \qquad (٨-٤)$$

حيث ف هى القوة الدافعة الكهربية العكسية التى تبعث بالإلكترونات من المصعد إلى المهبط، وتمثل المعادلة الأخيرة أقصى شغل كهربى يمكن أن نتوقعه من عملية أكسدة عكسية تامة لمول من الوقود.

وكفاءة خلية الوقود هى مقدار التغير فى الطاقة الحرة (التى هى أقصى قيمة للشغل المفيد بوسعنا الحصول عليه من أية منظومة) مقسومًا على حرارة التفاعل.

$$ع = \Delta ج \div \Delta ل = ١ - د \frac{\Delta ر}{\Delta ل} \qquad (٨-٥)$$

والكفاءة طبقًا للمعادلة (٨-٥) تمثل الكفاءة الحرارية لخلية الوقود بمفردها ولا تدخل فيها الفواقد التى تلازم الأدوات المساعدة التى لابد لها فى أى تنفيذ واقعى.

وبدلالة القوة الدافعة الكهربية العكسية للخلية تأخذ الكفاءة المعرفة بالمعادلة (٨-٥) الصورة:

$$ع_ن = \frac{- ن ق ف}{\Delta ل} = \frac{- ت ز ف}{\Delta ل} \qquad (٨-٦)$$

حيث ت هى التيار، ز الزمن الذى يسرى التيار خلاله.

ولخلية وقود تحت حمل خارجى ستهبط القوة الدافعة الكهربية الحقيقية (التى تدفع بالإلكترونات عبر الدائرة الخارجية) عن القيمة ف إلى قيمة أقل $ف_ح$

وتعطى الكفاءة الحقيقية بالمعادلة $ع_ح = \frac{- ن ق ف_ح}{\Delta ل} \qquad (٨-٧)$

وهناك صيغة أخرى للكفاءة نحصل عليها بقسمة المعادلة (٨-٧) على المعادلة (٨-٦)

$$ع_{ف} = \frac{ف}{ف_{ح}} \qquad (٨-٨)$$

وتقل هذه النسبة بزيادة كثافة التيار.

وهناك صيغة أخرى للكفاءة تستعمل، هى الجــزء الكهروميكــانيكى مــن التفاعل الذى يولد التيار، ويطلق عليها (كفاءة فاراداى) أو الكفــاءة التياريـــة $ع_{ت}$، ويمكن أن يعبر عنها بدلالة عدد المولات الإجمالى مــن الوقــود التــى تتفاعــل كهروميكانيكيًا فى الثانية الواحدة.

العوامل التى تحد من أداء خلية الوقود:

القابلية للتفاعل، وثبات الخواص هما المتطلبان المشتركان لكل خلايا الوقود، ولتحقيق متطلب القابلية للتفاعل يلزم أن تتوفر لدينا حسابات دقيقة للمواد المتفاعلــة والناتجة من التفاعل، كما يلزم توفر فاعلية عالية للأقطاب بما يكفل تولد تيــار ذى كثافة عالية، وهذان الشرطان اللازمان لقابلية التفاعل يتحكم فيهما إلى حــد كبيــر معدلات التفاعلات لدى القطبين وآلياتهما، وحتى وقتنا الراهن تعالج مسألة تنــشيط قابلية التفاعل باستعمال أقطاب مسامية من أجل زيادة المساحة البينية ما بين الغاز والقطب والمحلول الكهربى، وذلك بزيادة الضغط ورفع درجة الحرارة أو باستخدام عوامل كيميائية مساعدة.

و يعنى المتطلب الثانى (الثبات أو الصمود) أن تكون خلية الوقود فقط مجرد محول للطاقة، وأن تبقى – على عكس الحال مع البطارية التقليدية – بدون تغيرات خلال عمر خدمتها، ويستوجب هذا المتطلب عدم حــدوث أى تآكــل كيميــائى أو تفاعلات جانبية، ولا أى تغيير فى المحلول الكهربى أو الأقطاب.

ويرتبط متطلبا فعالية التفاعل وثبات الصفات ببعضهما الــبعض، فبزيــادة درجة الحرارة لتحسين نشاط التفاعل، قد تشترك الأقطاب فى تفاعلات الخلية، ومن ثم تفقد هذه الأقطاب خاصية الثبات، وإذا ما شغلت خلية الوقود فى درجة حــرارة

مقاربة لدرجة الغرفة فقد تحافظ الخلية على ثبات صفاتها، إلا أنها لن تمنحنا من الكهرباء إلا القليل.

وترجع الفواقد الحادثة لدى الأقطاب بصفة عامة إلى صورة ما من الاستقطاب، ويعنى الاستقطاب الفرق ما بين فرق الجهد لقطب معين، وفرق الجهد التجريبى عندما يسحب تيار ما من الخلية، ويمكن تصنيف فواقد الأقطاب إلى ثلاث فئات:

١ – استقطاب كيميائى.

٢ – استقطاب تركزى.

٣ – استقطاب مقاومى.

الاستقطاب الكيميائى:

هو ظاهرة تبدو على السطح، يتوقف مقدارها – جزئيًا – على الكيفية التى تتدفق بها الأيونات عند الأقطاب، وجزئيًا على معدل هذا التدفق.

استقطاب خلال التركيز:

هناك فى الخلية الكهروكيميائية فاقد فى الجهد، نتيجة عدم قدرة المادة المحيطة على الحفاظ على درجة التركيز الابتدائية للمائع بعد أن يبدأ التيار فى السريان، والنوع الأول من الاستقطاب مع اختلاف التركيز هو هبوط فى فرق الجهد نتيجة التغير فى تركيز المحلول الكهربى بالقرب من القطب فى أثناء التفاعل، والنوع الثانى من استقطاب تغير التركيز هو ذلك الناشئ عن التغيرات فى تركيز الغازات الداخلة فى التفاعل فى المحيط الملاصق لمنطقة التفاعل من القطب.

الاستقطاب نتيجة (وجود) المقاومة (الكهربية):

عندما يحدث تفاعل كهروكيميائى عند القطب يقع عمومًا تغير ملموس فـى معامل التوصيل النوعى للمحلول الكهربى، وهو ما يؤدى إلى فقد إضافى فى فرق الجهد، وعندما يوصل الحمل بخلية وقود ويسحب منها تيارًا تهبط الفولتيـة التـى نحصل عليها من القيمة النظرية ف إلى قيمة أقل ف ح.

قيمة الفولت الصافى = الفولتية النظرية ف – الهبوط فى الفولتيـة نتيجـة استقطاب التركيز لدى المهبط – الفاقد نتيجة الاستقطاب الكيميائى لدى المهـبط – الفاقد نتيجة استقطاب التركيز لدى المصعد – الفاقد نتيجة الاستقطاب الكيميائى لدى المصعد.

أنواع خلايا الوقود المختلفة:

يجرى اليوم تطوير عدد كبير من أنواع خلايا الوقود المختلفة، وقد وصـلت بعض عمليات التطوير هذه إلى مراحل متقدمة فى حين أنها لم تتخط فـى غيرهـا بعد مرحلة التجريب المعملى، ونستعرض فيما يلى بعضًا منها مما يمثل نماذج من تلك الأنواع العديدة.

الخلية الهيدروجينية – الأكسجينية:

يصور شكل (٨ – ٣) رسمًا تخطيطيًا لخلية وقود هيدروجينية – أكسجينية، ويلزم فيها قطبان مساميان يكفلان تلامس الغازات المتفاعلة مع محلـول التحليـل الكهربى (هيدروكسيد البوتاسيوم)، ويحدث لدى القطبين تبادل إلكترونى يؤدى إلـى سريان تيار فى الحمل الخارجى، إذ يتحد الهيدروجين (مادة الوقود) مـع أيونـات الهيدروكسيد من المحلول عند المصعد.

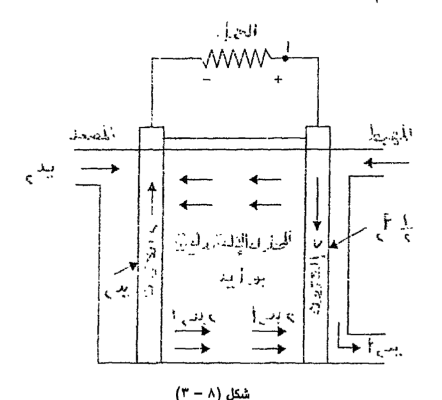
$$\text{يد}_{٢} + ٢\ \text{أ يد}^{-} \longrightarrow ٢\ \text{يد}_{٢}\ \text{أ} + ٢\ (\text{إلكترون})^{-}$$

وتنتقل الإلكترونات عبر التيار الخارجى إلى المهبط حيث تتفاعل مع الأكسجين (العامل المؤكسد).

٢ (إلكترون)$^{-}$ + $\frac{١}{٢}$ أ ٢ + يد ٢ أ ←———— ٢ (أ يد)$^{-}$

والنتيجة المحصلة من التفاعلين هى جزىء من الماء:

يد ٢ + $\frac{١}{٢}$ أ ٢ ←———— يد ٢ أ



شكل (٨ – ٣)

تصوير تخطيطى لخلية الوقود الهيدروجينية – الأكسجينية

يختلف التفاعل فى خلية الوقود عن الاحتراق، فالأكسدة فيها تعنى انتقال إلكترون عبر دائرة خارجية، وبذلك فإن جزءًا محسوسًا من طاقة التفاعل يحصل عليه فى صورة طاقة كهربية، والبقية فى صورة حرارة.

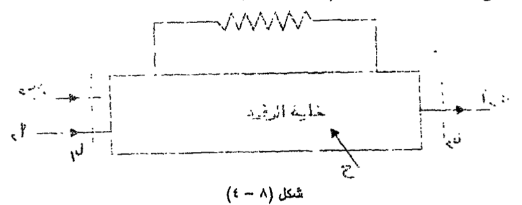
ولما كان كل جزىء من غاز الهيدروجين يؤدى إلى انتقال شحنتين من الإلكترونات، فإن مقدار الشحنة المنتقلة من كيلو جرام مول من الغاز يمكن تقديره بضرب شحنة الإلكترونين بعدد أفوجادرو:

٢ x شحنة الإلكترون x عدد إفوجادرو = ١,٩٣ x ١٠ ^٨^ كولوم

ويناظر هذا المقدار تيارًا قميته ١ أمبير يسرى لمدة ١,٩٣ x ١٠ ^٨^ ثانية، ويتوقف مقدار الطاقة الكهربية المستفاد منها فى الحمل الخارجى لكل كيلو جرام مول من الهيدروجين على فرق الجهد المتحصل عليه ف:

الطاقة المستفادة = ش. ف

ويمكننا اعتبار خلية الوقود بمثابة عملية سريان منتظمة حصيلتها من الشغل المفيد فى صورة طاقة كهربية (شكل ٨ – ٤):



شكل (٨ – ٤)

عملية السريان المنتظم فى خلية وقود

وترتبط محصلة الشغل المنتج ش وكمية الحرارة المدخلة ح بإنثالبيا المواد المتفاعلة ل١، وإنثالبيا نواتج التفاعل ل٢:

ل١ + ح = ل٢ + ش

ش = ل١ – ل٢ + ح

وفى خلية الوقود الهيدروجينية – الأكسجينية، تكون إشارة (ح) أى الحرارة الناجمة عن التفاعل سالبة، وعلى ذلك فالطاقة الكهربية أقل من الطاقة الحرارية الناتجة عن عملية الاحتراق المعتادة التى ينعدم فيها مقدار الشغل الميكانيكى بمقدار الفرق فى الإنثالبيا ($ل_١ – ل_٢$).

ويمكن حساب الطاقة الكهربية التى تنتجها الخلية من خلال خاصية ثرموديناميكية أخرى للمواد الداخلة فى التفاعل، وهى دالة جيبس **Gibbs function**، ففى عملية انعكاسية ثابتة درجة الحرارة وتحت ضغط ثابت يعادل الشغل مقدار التغير فى دالة جيبس، ويعطينا ذلك (عند درجة ٢٥° م):

ش = $ج_١$ – $ج_٢$ = ٥٦,٧ x ١٠ ^{٦} سعر حرارى / كجم مول من الهيدروجين

= ٢,٣٧ x ١٠ ^{٨} جول / كجم مول من الهيدروجين.

ويمكن الحصول على فرق جهد الخلية من الطاقة الكهربية:

$$ف = \frac{ش}{ش_١} = ١,٢٣ \text{ فولت}$$

وفرق الجهد (ف) هو فولتية الدائرة المفتوحة التى تم حسابها بإهمال الفواقد فى مقاومة الأقطاب واستقطاب المحلول الكهربى ونضوب المحلول الكهربى عند الأقطاب.

ويمكن مقارنة أقصى طاقة كهربية يمكن مقارنتها بطاقة الاحتراق ($ل_١ – ل_٢$).

$ل_١ – ل_٢$ = ٦٨,٣ x ١٠ ^{٦} سعر حرارى / كجم مول من الهيدروجين.

= ٢,٣٦(*) x١٠ ^{٨} جول / كجم مول من الهيدروجين.

(*) الرقم كما ورد فى الأصل المترجم وصحته ٢,٨٥ (المترجم)

وأقصى قيمة لكفاءة الخلية = $\frac{ش}{ل_١ - ل_٢}$

ع القصوى = $\frac{ش}{ل_١ - ل_٢}$ = ٠,٨٣

وعلى ذلك تصل القيمة القصوى لكفاءة خلية الوقود ٨٣%.

الخلايا الكيميائية الحيوية Biochemical Cells:

فى الخلية الكيميائية الحيوية تحسن التفاعلات عند أحد القطبين أو كليهما عن طريق عملية حيوية، وتصنف الخلايا الكيميائية الحيوية تقليديًا إلى طائفتين رئيسيتين:

١) خلايا غير مباشرة يتحول فيها الوقود الذى يغذى الكيان الحيوى إلى منتج فاقد يمكن جمعه واستغلاله فى خلية وقود مستقلة منفصلة.

٢) وفى الخلية المباشرة قد ينمو الكيان الحيوى بجوار القطب، ويستغل الفاقد الذى ينتجه خلال تحوله الحيوى **metabolism** (الأمونيا – الإيثانول – الهيدروجين وما إلى ذلك) رأسًا فى إنتاج الكهرباء.

وفى الخلايا غير المباشرة يستهلك الكيان الحيوى نفسه جزءًا كبيرًا من الطاقة، ومن هنا فلا يرجح أن تثبت مثل هذه الخلايا كفاءة عالية فى تحويل الطاقة، كما يواجه استعمال الخلايا الحيوية من النوع المباشر مشكلة توفير الظروف المواتية لنمو الكيان الحيوى.

الخلايا المتوالدة التجديدية:

فى خلايا الوقود التجديدية، يعاد تجديد (توليد) المواد الداخلة فى التفاعل من نواتجه، ومن ثم يعاد تدويرها، ويمكن أن ترتب عملية التجديد هذه بحيث تتم داخل خلية الوقود أو خارجها.

وهناك عدد من الطرق للتجديد المتاحة – على الأقل من الناحية النظريـــة، وتشمل:

١ – الطريقة الحرارية.

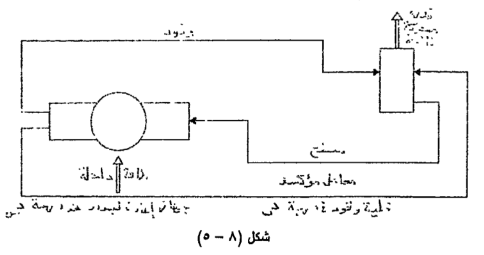
٢ – الطريقة الكهربية.

٣ – الطريقة الكيميائية.

٤ – طريقة النشاط الإشعاعى.

٥ – الطريقة الضوئية الكيميائية.

ويصور شكل (٨ – ٥) مخططًا عامًا لخلية تجديدية.



شكل (٨ – ٥)

رسم تخطيطى عام لخلية وقود تجديدية

وفى خلية تجديدية حرارية يتفاعل الوقود ø مع العامل المؤكسد عند درجة د ب، ليكون منتجًا øس ويفرز هذا التفاعل طاقة كهربية، ويعاد ناتج التفاعل إلـــى جهاز إعادة تجديد **regenerator** حيث يتحلل مرة أخرى إلى المواد الداخلـــة فـــى التفاعل عند درجة حرارة أعلى د س، وتحت هذه الظروف يمكن أن ينظـــر إلـــى النواتج كالمائع الوسيط (الشغال) فى دورة حرارية تتحول فيها الحرارة إلى شـــغل

كهربى ومن ثم فهى عرضة للعوامل التى تحد من الكفاءة فى دورة كـارنو وهـذه العوامل تنطبق حتى لو تعرض المائع الوسيط للتحلل ثم العودة ثانية للاتحاد، ورغم أن خلية الوقود نفسها مستثناة من العوامل التى تحد من كفاءة دورة كارنو، فالاتحاد الكيميائى لا يخضع لهذا الاستثناء. وفيما يلى بعـض الأرقـام المستخلـصة مـن البحوث على الخلايا التجديدية من النوع الحرارى.

١) الخلايا التجديدية من النوع الحرارى ذات كفاءة متوسطة (مـن ٥ إلـى ٢٠%)، وثبت أن عمرها يمتد حتى ١٢٠٠٠ ساعة.

٢) فى المنظومات التى تبرد بالهواء يعتمد حجم جهاز التجديد فـى المقـام الأول على معامل انتقال الحرارة من المكثف إلى الهواء.

ومن المعقول أن نجد أن المنظومات المتكاملة التجديدية من النوع الحرارى ذات السعة التى تتراوح ما بين ١، ١٠ كيلو وات سيكون لها سعات قدرة نوعيـة $١٠^{-٢}$ كيلو وات/ كجم تقريبًا.

الباب التاسع

المولدات الأيونية الحرارية والكهروحرارية

المولدات الأيونية الحرارية:

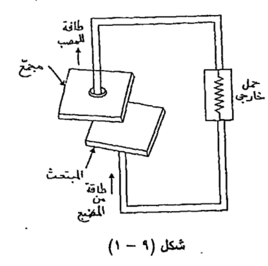
مقدمة:

قبل أكثر من مائتى عام رصد دى فاى **Du Fay**، أن الفضاء على مقربة من جسم ساخن لدرجة الاحمرار، هو وسط موصل للكهرباء، وفى ١٨٥٣ نشر إدموند بيكيريل **Edmond Becquerel** ملحوظة له عن أن جهدا قدره بضعة فولتات فقط كان كافيًا لدفع تيار يمكن قياسه بجهاز جلفانومتر عبر الهواء الساخن بين قطبين بلاتينيين، إلى درجة حرارة تناظر درجة الاحمرار، وبين عام ١٨٨٢، ١٨٨٩ أجرى إيلستر وجيتل **Elster and Geitel** تجاربهما على جهاز محكم يحتوى على إلكترودين، وأرسيا تلك القاعدة أنه عند درجات الحرارة المنخفضة نسبيًا، يمر التيار الكهربى بسهولة أكثر إذا شحنت الفتيلة الساخنة بشحنة موجبة، وأشار توماس ألفا أديسون **Thomas Alva Edison**، سنة ١٨٨٣ إلى أنه رصد فى وقت مبكر الانبعاث الأيونى الحرارى، وقد تعرف ج. ج تومسون **J.J. Thomson** فى ١٨٩٩ على طبيعة حاملات الشحنة، بقياس النسبة بين شحنتها وكتلتها، وبين أنه – داخل نطاق حدود اللايقين المتعارف عليه فى التجارب العلمية، تعود هذه القيمة إلى الإلكترونات، ومع حلول عام ١٩٣٣ حقق لانجموير **Langmuir** استيعابًا كافيًا للظاهرة يمكن من بناء أنواع عديدة من المحولات الثرميونية.

المبادىء الفيزيائية الأساسية للمحول الثرميونى:

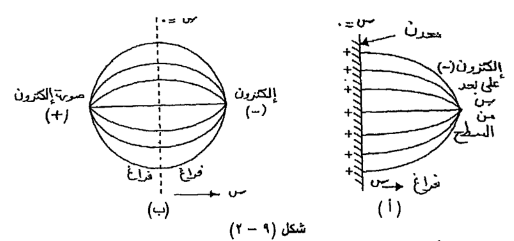
يتركب محول الطاقة الثرميونى من سطحين لقطبين، يحتفظ بأحدهما (ويطلق عليه الباعث أو المبتعث **emitter**) فى درجة حرارة عالية، فى حين يبقى القطب الآخر أو المسمى بالمجمع (**collector**) عند درجة حرارة أقل، ويفصل

بينهما إما فراغ أو بلازما (انظر شكل ٩ – ١)، وتكتسب الإلكترونات فى المبتعث طاقة حرارية تكفى لها لكى تتحرك فى نوع من الحركة العشوائية التزاحمية التـــى تشجع بعضاَ منها على أن تفلت من سطح المبتعث، وتدلف إلى المجمع، ثم تعـــود إلى المبتعث عبر حمل خارجى، ومن ثم تولد قدرة كهربائية، وفى كل خطوة مـــن الخطوات التى سلف شرحها تبرز تعقيدات تعيق انتقال الإلكترونات، وستعالج هذه المسائل بالتفصيل عند دراسة وظيفة عمل القطبين و التحكم فى شحنة الفراغ.



شكل (٩ – ١)

رسم تخطيطى لمحول ثرميونى يعمل كآلة حرارية



شكل (٩ – ٢)

أ – خطوط المجال الكهربى لإلكترون على مقربة من سطح المعدن

ب – خطوط المجال الكهربى لصورة شحنة إلكترون موجبة+،

ولإلكترون– على مسافتين متساويتين من الخط س =.

دالة الشغل Work Function:

يمكن النظر إلى تركيب القطب (الإلكترود) على أنه ذرات مرتبة فى نسق هندسى (يسمى بالتشبيكة الذرية Lattice) بحيث تتذبذب حول مركز اتزانها، والإلكترونات التى تدور فى أقصى المدارات الخارجية للذرة لا تقيدها إلى ذرتها الأم إلا قوة ضعيفة، ومن ثم فقد تغادر مدارها الأصلى للدخول فى مدار آخر حول نواة أخرى.

وعلى ذلك فإلكترونات آخر المدارات من الخارج لا تنتمى إلى ذرة بعينها، ومن هنا تسمى بالإلكترونات الحرة، وحينما تفقد ذرة ما واحدًا من إلكتروناتها فإنها تكتسب شحنة موجبة، وبالتالى فالقطب (الإلكترود) مكون من ذرات موجبة الشحنة، وفى درجة الصفر المطلق من شأن الطاقة الحركية للإلكترونات الحرة أن تقع فى نطاق حالات كمومية من الصفر وحتى قيمة عظمى هى التى يطلق عليها مستوى أو منسوب فيرمى **Fermi level**.

ومن المفترض أن الإلكترونات الحرة محتبسة فى المعدن عن طريق قوى التجاذب بين شحنتين مختلفتى الإشارة.

ويمكن حساب مقدار قوة التجاذب هذه باستعمال أسلوب انعكاس الصور على المرايا فالمجال إلى اليمين من المستقيم س = صفرًا متماثل فى شكلى (٩ – ٢ أ)، (٩ – ٢ب)، ومن ثم فالقوة المؤثرة على إلكترون على مبعدة (س) من السطح هى هى كما لو كان سطح المعدن قد استبدل به شحنة موجبة مقدارها (أ) على مسافة (– س) وعلى ذلك فالقوة المؤثرة على الإلكترون تساوى $\frac{\text{أ}^2}{\text{١٦ ط ت}\,\epsilon\,.\,\text{س}^2}$ ، والطاقة اللازمة للتغلب على هذه القوة هى ما يسمى بشغل السطح أو دالة الشغل **work function**.

وللأقطاب فى محول الطاقة الثرميونى مستويات فيرمى مختلفة، فللمبتعث مستوى فيرمى منخفض فى حين يكون المجمع فى مستوى فيرمى مرتفع نسبيًا، ومن هنا فإذا ما ارتفع إلكترون بالمبتعث بعيدًا عن سطحه فسيحتاج إلى مقدار أعلى من الطاقة أكثر مما يحتاجه إلكترون مناظر له كى يرتفع عن سطح المجمع، ومن ثم فدالة الشغل للمبتعث أعلى من دالة شغل المجمع.

فإذا سلط ما يكفى من الحرارة من مصدر ذى حرارة مرتفعة على المبتعث، فستكسب بعض إلكتروناته الحرة عالية الطاقة لدى منسوب فيرمى، طاقة تمكنها من الإفلات من سطح المبتعث، وبعبارة أخرى ستكتسب طاقة مساوية لدالة شغل المبتعث، علاوة على بعض الفائض فى طاقة الحركة، وفى الحالة المثلى ستعبر الإلكترونات الفجوة ما بين المبتعث والمجمع دونما بذل لأية طاقة، وعندما ترتطم الإلكترونات بالمجمع، ستطلق طاقتها الحركية علاوة على طاقة تعادل دالة شغل المجمع، حيث يلزم مقدار من الطاقة يساوى دالة شغل المجمع للإلكترون لكى يتمكن من المرور خلال سطح المجمع، وينبغى أن تلفظ هذه الطاقة فى صورة حرارة من المجمع ذى درجة الحرارة المنخفضة، وإذ يصل الإلكترون إلى مستوى طاقة فيرمى الخاص بالمجمع، فإنه يكون ذا طاقة أعلى من إلكترون فى مستوى طاقة فيرمى الخاص بالمبتعث، وهذا المستوى الأعلى من الطاقة يمكن استغلاله بإمراره خلال حمل خارجى وتشغيله.

التحكم فى شحنة الفراغ:

تمثل الإلكترونات دور المائع الوسيط الذى يعمل فى المحول الثرميونى، وتولد الإلكترونات شحنة فى الفراغ فى المنطقة ما بين المبتعث والمجمع، وما لم تتخذ إجراءات للحد من تعاظم قيمة هذه الشحنة فإنها ستؤدى بشدة إلى الحد من

كفاءة المحول الثرميونى، ومن شأن إدخال أيونات موجبة فـى الفـراغ مـا بـين القطبين أن يحد من شحنة الفراغ هذه ويهبط بها إلى القيمة المرغوبـة، وأن يتـيح وجود تنويعات من توزيعات فرق الجهد، والعوامل التى تزيـد مـن تعقيـد هـذه الظاهرة هى تأين السطح، وتبعثر الإلكترونات، وطبقات السطح الممتـصة، والآن فلنأخذ السيزيوم، والذى يمثل أعلى المواد الوسيطة قـدرة علـى تحييـد سـحابة الإلكترونات وأوسع هذه المواد انتشارًا.

فحينما يرتفع ضغط السيزيوم فى مولد ثرميونى بينما يحتفظ بدرجة حـرارة المبتعث ثابتة، فإن تيار الأيونات المنبعثة سيزداد فى تناسب طردى فـى البدايـة، وعندما يبدأ امتصاص السيزيوم على السطح – على أية حال – سيبطئ التنـاقص المناظر فى دالة شغل السطح، من معدل زيادة انبعاث الأيونات، وفى واقع الحال، بتوالى ازدياد الضغط ستبلغ الأمور نقطة قد يؤدى زيادة ضغط السيزيوم عندها إلى نقص فى انبعاث الأيونات.

وعلى الجانب الآخر سوف يزداد – بصفة عامة – انبعـاث الإلكترونـات بازدياد ضغط السيزيوم، وهناك قيمة لضغط السيزيوم تنتج مقدارًا مـن الأيونـات يكفى بالكاد (لتحييد) شحنة الفراغ، ودالة شغل السطح المناظرة لقيمة الضغط هـذه ($ø_ح$) تسمى بدالة الشغل المحيدة **neutralization work function**.

وقيمة دالة الشغل المحيدة لمعدن معين، هى دالة – وإن بارتباط ضـعيف – بدرجة حرارة السطح، ونظرًا لضيق نطاق درجات حرارة المبتعث التى تـستخدم فعليًا فى المحولات الثرميونية (من ١٢٠٠ إلى ١٨٠٠ ° م) فإن قيمة مفردة للدالة $ø_ح$ لكل معدن تعد مؤدية للغرض من الناحية العملية.

وبالنظر إلى طبيعة حالة الغاز المتأين فيما بين القطبين، طرح هيمكويـست **Hemquist** ثلاثة أوضاع أساسية لتشغيل المحولات الثرميونية التى تعمل ببخـار السيزيوم:

١) **وضع البلازما:** ويتسم هذا الوضع بضغط منخفض للـسيزيوم ودرجـات حرارة عالية للمبتعث، وينتج عن هذا الوضع مبتعث خال من السيزيوم.

٢) **وضع الضغط العالى:** وفى هذه الحالة قد يصل ضـغط الـسيزيوم إلـى بضعة ملليمترات من الزئبق (أو تور **Torr**) ويسبب هذا تغطى سـطح المبتعث بالسيزيوم، مما يستدعى وجود مسافة صغيرة ما بين القطبـين للحد من الفاقد الناجم عن تصادمات الإلكترونات.

٣) **وضع القوس arc:** ويحدث عند درجة حرارة أقل مما فى وضع الضغط العالى.

مواد تصنيع المحول الثرميونى:

أهم الخواص اللازمة فى مادة لتصنيع مبتعث جيد هى:

١) قدرة كبيرة على بث الإلكترونات، مقترنة بمعدل اضمحلال بطىء فـى هذه القدرة.

٢) معامل انبعاث منخفض للتقليل من الفاقد الحرارى بالإشعاع من المبتعث.

٣) يجب أن تختار مادة لا تغير من خـواص المجمـع، إذا مـا حـدث أن تبخرت هذه المادة ثم تكثفت بعد ذلك على المجمع، فمـن شـأن تغيـر الخواص أن يقلل من فاعلية المجمع.

ويوضح الجدول رقم (٩ – ١) القيمة التقريبية لدالة الشغل لـبعض المـواد التى يشيع استخدامها فى عمل المبتعثات.

جدول (٩ – ١)

القيم التقريبية لدالة الشغل المحيدة

المادة	قيمة $\emptyset_{ح}$ بالفولت
التنجستين متعدد البلورات	٢,٦٥
الرينيوم(*) متعدد البلورات	٢,٨٠
النيوبيوم متعدد البلورات	٢,٥٥

والفيصل الرئيسى فى اختيار مادة المجمع هو أن تكون ذات دالة شغل منخفضة بقدر الإمكان، ولأن درجة حرارة المجمع تحفظ عند حد أدنى من درجة الحرارة التى تتسبب فى انبعاث محسوس من الإلكترونات فإن خواصها الابتعاثية الحقيقية لا يترتب عليها أية تداعيات، وعلى أية حال فكلما انخفضت قيمة دالة شغل المجمع، قلت الطاقة التى على الإلكترون أن ينبذها لدى تغلغله فى سطح المجمع، ومن الناحية العملية يصل الحد الأدنى لدالة شغل المجمع $\emptyset_{م}$ بحيث يبقى مستقرًا، إلى زهاء ١,٥ إلكترون فولت، ولمجمع درجة حرارته ١٢٧٣ على مقياس كلفن تبلغ القيمة المثلى للمقدار $\emptyset_{م}$ نحو ١,٦ إلكترون فولت، وقد شاع استخدام الموليبدنم فى عمل المجمعات، وتقدر قيمة دالة شغله بزهاء ١,٧ إلكترون فولت.

(*) عنصر وزنه الذرى ١٨٦,٣١ يغلى عند درجة ٥٥٣٠° م رباعى وسباعى التكافؤ وله سبعة نظائر (المترجم)

المولدات الكهروحرارية:

مقدمة:

هناك حاجة ملحة إلى محول طاقة قليل الضجيج، ذى اعتمادية عالية ولا يحتوى على أجزاء متحركة، لتحويل الحرارة إلى قدرة كهربية، وقد قاد ذلك المهندسين إلى أن ينظروا بعين الاعتبار إلى مجموعة من الظواهر تسمى بالتأثيرات الكهروحرارية، إن هذه الظواهر التى تم التعرف عليها منذ مئات السنين قد أفضت إلى إتاحة الفرصة لتطوير مصدر للقدرة الكهربية، صغير ومستقل بذاته.

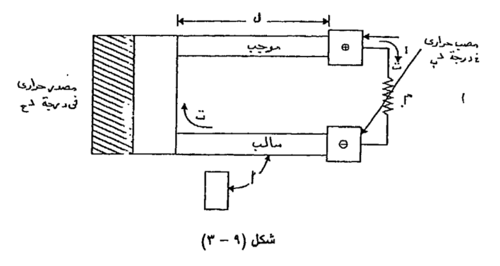
لقد أتم التنكيرش **Altenkirch** الصياغة الرئيسية لنظرية المولدات الكهروحرارية فى صورتها المرضية عامى ١٩٠٩، ١٩١١، وقد وضحت أبحاثه الحاجة إلى مواد لها معامل سيبيك **scebeck**(*) وتوصيلية كهربية مرتفعان لتقليل الحرارة المفقودة، ولها توصيلية حرارية منخفضة لتقليل تسرب الحرارة خلال الجهاز، ورغم أن التنكيرش قد عدد الخواص المرغوبة فى المواد التى يجب أن تستعمل فى الأجهزة الكهروحرارية، فقد انقضت خمسون سنة قبل أن تعرف تلك المواد وتنتشر بوفرة، وذلك فور أن بدأ استخدام أشباه الموصلات، تلك الثورة التقنية فى خمسينيات القرن العشرين، والتى أعادت – على نحو ما – اكتشاف الكهرباء الحرارية ووضعتها موضع التطبيق فى عدد من الاستعمالات الطريفة.

(*) معامل سيبك هو مقدار التغير فى القوة الدافعة الكهربية مع درجة الحرارة أو هو فولتية الدائرة المفتوحة بين نقطتى موصل (المترجم)

تحليل تكوين المولد الكهروحرارى:

الافتراضات الأساسية:

لتحليل ظاهرة المولد الكهروحرارى، علينا وضع افتراضات معينة للتبسيط، والتحليل مبنى على أساس النموذج الموضح بشكل (٩-٣).



شكل (٩ – ٣)

نموذج للمولد الكهروحرارى

ويتكون المولد الكهروحرارى من عنصرين من أشباه الموصلات، أحدهما من مادة من النوع الموجب والآخر من مادة من النوع السالب، وقد افترضت – بغرض التبسيط – الافتراضات الآتية:

١) المولد يعمل بين درجتى د ح العالية، د ب الباردة، وهما درجتا الحرارة الواقعيتان عند الوصلتين بين المواد الفعالة بشبه الموصل، والمستودع الموصلة به هذه المواد.

٢) ليس هناك انتقال للحرارة بين المستودعات عند درجتى د ح، د ب إلا خلال العناصر الكهروحرارية دونما انتقال حرارى عرضى إلى أذرع الجهاز.

٣) المقاومة الكهربية لنقطة تلامس الوصلة يمكن إهمالها مقارنة بالمقاومة المركزة فى الأذرع.

٤) الأذرع لها مساحة مقطع عرضى ثابتة.

٥) المقاومة النوعية الكهربية resistivity (e) والتوصيلية الحرارية (λ) ومعامل سيبيك للمادة لا تتغير بتغير درجة الحرارة وغير مرتبطة بها.

٦) مقاومة التلامس الحرارى بين المصدر وقضبان التوصيل العمومية (خطوط التوزيع) بين العنصرين الموجب والسالب يمكن – بتحقيق عزل كهربائى جيد – تقليلها، وينطبق نفس الافتراض على مصب الطاقة sink.

القدرة المنتجة من المولد:

القدرة المنتجة تساوى ببساطة حاصل ضرب مربع التيار (ت) فى مقاومة الحمل الكهربية م.

$$ق_. = ت^{٢} م_.$$

وفرق الجهد للدائرة المفتوحة = $\alpha\ \Delta$ د، حيث α هى معامل سيبيك المحصل للوصلة.

$$\alpha = \left|\alpha \text{ موجب}\right| + \left|\alpha \text{ سالب}\right| ،\ \Delta د = د_{ح} - د_{ب}$$

وعلى ذلك فشدة التيار المسحوب من المولد ت = $\alpha\ \Delta$ د ÷ (م + م.)

(٩–٢)

$$\text{حيث } م = \frac{\rho_{ح}}{\gamma_{ح}} + \frac{\rho_{س}}{\gamma_{س}} ،\ \gamma = \frac{\text{مساحة المقطع س}}{\text{الطول ل}}$$

ومن المرغوب فيه أحيانًا الوصول لأقصى قدرة من المولد، فإذا ما عبرنا عن القدرة المنتجة بدلالة نسبة المقاومة مَ، واعتبرنا شدة التيار المعطاة بالمعادلة (٩ – ٢) فإننا نحصل على:

ق. = $(\alpha \Delta$ د$)^{2}$ مَ ÷ (١ + مَ)^{2} م (٩ – ٣)

ويمكن الوصول إلى قيمة ق. العظمى وفقا للخطوات المعتادة(*)، وتؤدى هذه الخطوات إلى النتيجة المعروفة، وهى أن قيمة مَ التى تناظر أعلى قيمة لـ ق. هى الوحدة، أى عندما تكون م. = م

وعند تصميم مولد للحصول على أقصى قدرة، يجتهد المرء للوصول إلى أقل حجم وأقل وزن، أى أقل مقدار من المادة الكهروحرارية، ولتحقيق هذه الأهداف ينبغى الوصول للقدرة القصوى لكل وحدة من المساحة الكلية أى $\frac{ق.}{س_{ك}}$. وبالإضافة إلى ذلك يجب أن يكون طول العنصر أقل ما تسمح به الظروف العملية، إلا أن هناك حدًا أدنى لهذا العامل، إذ أنه بعناصر شديدة القصر، لا تعود مقاومة نقاط التلامس مما يمكن إهماله مقارنة بمقاومة العناصر، ويمكن إيجاد القدرة المنتجة لكل وحدة مساحات من مساحة المقطع بالتعويض بالمقدار (١) لقيمة مَ فى المعادلة (٩–٣) والقسمة على مساحة العنصرين س $_{س}$، س $_{جـ}$ فنحصل على:

$$\frac{ق.}{س_{كل}} = (\alpha \Delta د)^{2} \div ٤ \text{ هـ } \left[\frac{\ell_{س}}{س_{س}} + \frac{\ell_{جـ}}{س_{جـ}} \right] (س_{س} + س_{جـ}) \quad (٩–٤)$$

حيث س$_{كل}$= س $_{س}$+س $_{جـ}$، ولقد افترض أن العنصرين من النوعين السالب والموجب لهما نفس الطول، ويصل المقدار فى المعادلة (٩–٤) لقيمته العظمى عندما يصل مقام الكسر إلى حده الأدنى.

وبحساب مشتقة المقام بالتفاضل بالنسبة للمقدار $\frac{س_{س}}{س_{جـ}}$، نحصل على نسبة المساحة التى تحقق أعلى قيمة فى المعادلة (٩–٤) وهى:

$$\frac{س_{س}}{س_{جـ}} = \left(\frac{\ell_{س}}{\ell_{جـ}} \right)^{\frac{1}{٢}} \quad (٩–٥)$$

(*) يقصد بالخطوات المعتادة إجراء تفاضل للمعادلة بالنسبة للمتغير ومساواة الناتج بالصفر للوصول إلى قيمة المتغير التى تحقق القيمة العظمى (المترجم)

الباب العاشر

طاقة الرياح

مقدمة:

طاقة الرياح هى شكل غير مباشر من الطاقة الشمسية، إذ يتحول زهاء ١% من إجمالى الإشعاع الشمسى الذى يصل الأرض – وهو فى الجو – إلى طاقة رياح، وتنجم الرياح من الفارق بين سخونة اليابسة والجو المحيط بها بفعل الشمس، وفيما تسخن الشمس أجزاء مختلفة من الأرض وبمعدلات متباينة، يتحرك الهواء من المناطق الباردة إلى المناطق الدافئة مولدًا الرياح.

إن الحجم الكلى لهذا المصدر جد ضخم، ويختلف – بمرور الوقت – لدى موضع بعينه.

وطاقة الرياح متجددة، ولا يترتب عليها أى مشاكل ذات بال، وليس من المنطق إهمال المخزون من طاقة الرياح وعدم استغلاله فى مختلف التطبيقات فى بلاد كالهند، حيث تتاح كميات هائلة من طاقة الرياح، وتشير التقديرات لمخزون طاقة الرياح فى الهند إلى رقم يتخطى ٢٠٠٠٠ ميجاوات من القدرة الممكن توليدها، وطبقا لتقييم حديث، تتبوأ الهند مرتبة عالية للغاية بين الدول النامية، حيث يمثل المخزون من طاقة الرياح خيارًا مبشرًا بحق.

لذلك، فإن مستقبل طاقة الرياح فى الهند ينبغى أن يعد بديلا اقتصاديًا لمصادر القدرة الكهربائية التقليدية.

وخلال العشرين عامًا الماضية(*)، تحقق تقدم بارز فى التقنية المستخدمة فى تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية، ولقد أدخل أكثر من ١٥٠٠٠ توربين رياح

(*) اعتبارًا من عام ٢٠٠٣، عام إصدار هذا الكتاب (المترجم)

فى كاليفورنيا، ٢٨٠٠ توربين رياح فى الدانمارك فى شبكات المرافق، وجرى تشغيلها بطريقة روتينية مع المصادر التقليدية كمحطات الكهرباء المائية، والمحطات العاملة بالوقود الأحفورى، ومحطات التوليد النووية.

وليس هناك من سبب أساسى فى عدم التعامل مع توربينات الرياح كجزء رئيسى فى أية شبكة مرافق حيثما توافرت مصادر رياح جيدة بشرط أن تقوى على منافسة النظم المعتاد عليها من ناحية التكلفة، والاعتمادية والقبول لدى عامة الجمهور، وعلى الرغم من أن تقنية طاقة الرياح تستدعى إيلاء عناية واهتمام إلى التفاصيل العلمية والهندسية، فإنها فى متناول قدرات معظم البلدان – إن لم يكن كلها، وهى تقنية فى سبيلها لأن تكون منافسة اقتصاديًا فى مناطق عديدة حول العالم.

تقنية طاقة الرياح:

الاعتبارات الأساسية:

يمكن تقدير طاقة الحركة (ط) لكمية تفاضلية من الهواء حجمها ح (دس)" وكثافتها ث ومتحركة بسرعة ع، حيث ح هى وحدة المساحات فى اتجاه عمودى على اتجاه سريان الرياح، د س مسافة تفاضلية موازية لاتجاه الرياح، وذلك من المعادلة:

$$ط = \frac{ث\ ح\ (د\ س)\ ع^{2}}{2}$$

ويعرف فيض الطاقة ف ر (أو كثافة طاقة الرياح) بمعدل تغير المقدار $\frac{ط}{ح}$ بالنسبة للزمن ويعطى من المعادلة $ف_{ر} = \frac{د\ ط}{د\ ز} \times \frac{1}{ح} = \frac{ف}{2}\left(\frac{د\ س}{د\ ز}\right)ع^{2}$

$= \frac{1}{2}\ ث\ ع^{3}$.

ولا تتاح شدة (كثافة) قدرة الرياح بكاملها لتحويلها إلى شغل مفيد. وأكبر قـــدرة يمكن استـــخلاصها من تيـــار الـــرياح هى $\frac{١٦}{٢٧}$× ف ر = ٠,٥٩٣ ×ف ر.
ويطلق على هذا المقدار حد بيتز **Betz limit**.

وبما أن شدة قدرة الرياح تختلف طبقا لمكعب سرعتها، فينبغـــى أن يـــصمم توربين الرياح بحيث يمكنه العمل عبر نطاق عريض من التغير فـــى ف ر حتـــى يستوعب التغيرات النمطية فى سرعة الرياح، فعلى سبيل المثال. إذا تميزت مساحة ما بسرعة رياح متوسطها ع م، فإن كثافة القدرة المتاحة إذا هبطت سرعة الريـــاح إلى ٠,٥ ع م، تصبح فقط $\frac{١}{٨}$ تلك المتاحة مع السرعة ع م. فى حين إذا تضاعفت السرعة إلى ٢ ع م فإن كثافة القدرة تتضاعف ٨ مرات عن تلك المناظرة للسرعة ع م، وعلى ذلك لا تغل سرعات الرياح التى تقل عن المتوسط إلا الـــضئيل مـــن القدرة المفيدة، ومن ناحية أخرى فإن السرعات التى تتجاوز بكثير المتوسط. تشكل استهلاكًا عاليًا لأجزاء التوربين (المحرك)، ولذا فإن التحدى الفنى يتمثل فى تصميم محرك رياح يمكنه أن يعمل بكفاءة واعتمادية عبر التغيرات الكبيرة فى قيمة ف ر، على الرغم من الظروف الجوية التى تصل إلى حد التطرف، مع الحد الأدنى مـــن متطلبات الصيانة، والنزول بالتكاليف الرأسمالية الابتدائية على قدر الإمكان.

ولا تبقى سرعة الرياح فى منطقة ما ثابتة، وإنما تتغير على مدار فترات من الزمن بالثوانى والساعات (تغير يومى نهارى) والأيام والشهور (التغير الموسـمى). وينبغى أن يواجه توربين الرياح التغيرات الكبيرة فى سرعة الريـــاح، ويـــشار إلـــى التذبذبات التى تحدث على مدى الثوانى أو الدقائق (بالاضطرابات)، وقد تتسبب فـــى كلل(*) أجزاء توربين الرياح وانهيارها (كالريش وأعمدة التوصيل والمولدات).

(*) الكلل **fatigue**: خاصية ميكانيكية للمواد تدل على مدى قدرتها على تحمـــل التغيـــرات الدوريـــة فـــى الإجهادات المسلطة عليها (المترجم)

ومن المعتاد – لحساب شدة قدرة الرياح – قياس متوسط سرعة الرياح على مدار فترة زمنية (ساعة عادة)، وتوصف التكرارية التى تتواتر بها مختلف سرعات الرياح بتوزيع تكرارية سرعة الرياح ت (س) والتى يمكن أن تتغير يوميًا وفصليًا، وإذا لم تتح معلومات عن توزيع التكرارية فيفترض توزيع رالى فى الغالب، وتأخذ دالة شدة احتمالية رالى **Rayleigh** الشكل:

$$\text{ت}(\text{س}) = \frac{\text{ط س}}{٢} (\text{س}_{\text{م}})^{-٢} \times \text{هـ}^{-٠,٢٥\ \text{ط} \left(\frac{\text{س}}{\text{س}_{\text{م}}}\right)^{٢}}$$

وربما تغيرت سرعة الرياح وتوزيعها التكرارى مع الارتفاع، وعلى العموم تؤخذ القياسات للرياح عند ارتفاع معيارى هو فى الغالب قريب من ١٠ أمتار، ويختلف ذلك عن ارتفاع محور توربينات الرياح الحديثة، والذى يتراوح بين ٢٥ إلى ٥٠ مترًا، ولتعميم هذه القياسات لتشمل الارتفاع المطلوب يفترض فى الغالب أن سرعة الرياح تتناسب مع الارتفاع مرفوعًا إلى الأس $\frac{١}{٧}$.

ويطلق على زيادة سرعة الرياح مع الارتفاع عن سطح الأرض ع عادة اسم القص الريحى **wind shear**، وهو فى العادة دالة فى وعورة السطح، وسرعة الرياح ومدى استقرار الجو.

وتأسيسًا على بيانات مأخوذة من عدة مواقع تكون هذه الدالة – للمناطق ذات وعورة سطح منخفضة فى الصورة:

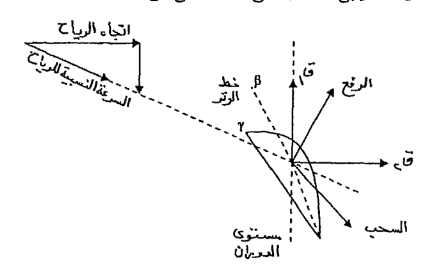
$$\text{س}(\text{ع}_{٢}) = \text{س}(\text{ع}_{١}) \times \left(\frac{\text{ع}_{٢}}{\text{ع}_{١}}\right)^{\frac{١}{٧}}$$

الديناميكا الهوائية:

تستخلص توربينات الرياح الحديثة الطاقة من تيار الرياح عن طريق تحويل طاقة حركة الرياح الخطية إلى الحركة الدورانية المطلوبة لإدارة المولد الكهربى، وينجز هذا التحويل فى جزء دوار **rotor** ذى ريشة أو ريشتين أو ثلاث ريش أو

سطح انسيابى مثبت بالمحور، وتولد الرياح المنسابة عبر أسطح هذه الأشكال الانسيابية القوى التى تتسبب فى دوران الجزء الدوار.

ويولد الهواء المنساب بسلاسة فوق الشكل الانسيابى قوتين: الرفع **lift** الذى يعمل فى اتجاه عمودى على تيار الهواء، والسحب **drag** الذى يعمل فى اتجاه التيار (شكل ١٠ – ١)، وإذا لم يكن تيار الهواء متصلا، فإن قوة الرفع تتقلص ويقال للسطح الانسيابى إنه (أعيق **stall**) وتتناسب كلا قوتى الرفع والسحب مع كثافة الهواء، ومساحة الشكل الانسيابى ومربع سرعة الرياح (فى حالة السريان الرقائقى) **laminar flow** وتصل القوتان إلى قيمتهما القصوى عند قيمة محددة لزاوية الالتقاء حـ (وهى الزاوية بين متجه سرعة الرياح النسبية وخط الوتر أو الخط القطرى) وحيث إن سرعة الريشة تزداد مع المسافة عبر سطح الشكل الانسيابى، فينبغى أن تتغير بالتبعية زاوية الالتقاء على طول هذا السطح، وبعبارة أخرى، ينبغى أن يتقوس (ينحنى) الشكل الانسيابى لنحصل على الحد الأعلى من الكفاءة.



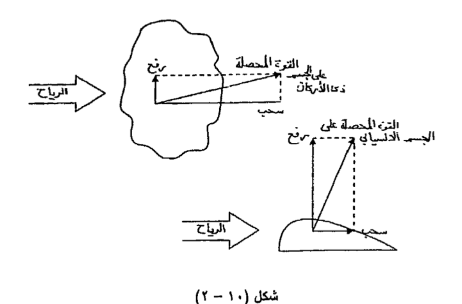
شكل (١٠ – ١)

قوة الرفع وقوة السحب وزاوية الالتقاء γ وزاوية الخطوة β لسطح انسيابى لتوربين رياح

وقوة الرفع وقوة السحب عمودية وموازية – على الترتيب – لسرعة الرياح كما يدل على ذلك دوران الجزء الدوار، ويمكن تحليلهما إلى مركبتين (قوتين) ق١ فى اتجاه الحركة الانتقالية للشكل الانسيابى، ق٢ فى اتجاه الرياح الساكنة غير المثارة **undisturbed wind**. والقوة ق١ هى المتاحة للحصول على الشغل النافع، فى حين أن البرج والأجزاء الهيكلية من توربين الرياح تصمم بحيث تتحمل ق٢ (والتى يطلق عليها قوة دفع الجزء الدوار).

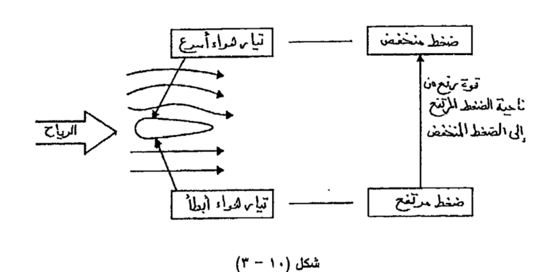
قواعد تحويل طاقة الرياح:

عند هبوب الرياح فإنها تسلط نوعين من القوى على الأجسام التى فى مسارها: الرفع والسحب، وتعمل قوى السحب فى نفس اتجاه هبوب الرياح فى حين تعمل قوى الرفع فى اتجاه عمودى على حركة الرياح، ويعتمد الحجم النسبى لكل من قوتى السحب والرفع بالكامل على شكل الجسم، فالأجسام ذات الشكل الانسيابى تتعرض لقوى سحب أضأل من تلك التى تتعرض لها الأجسام غير الانسيابية (ذات الأركان) وتولد الرفع يتسبب دائمًا فى قدر ما من قوى السحب، والأجسام ذات الشكل الانسيابى المناسب يمكن أن تبلغ قوى رفعها ٣٠ ضعفا من قوى السحب، ويوضح شكل (١٠ – ٢) النسب بين قوى الرفع والسحب للأجسام غير الانسيابية والانسيابية، وتجهيزات الرفع – بطبيعتها أكثر كفاءة من تجهيزات السحب، وتنجم قوى الرفع كنتيجة للفرق بين سرعتى تيار الهواء المنساب حول جانبى السطح المحمول، إذ يهبط الضغط قرب السطح الذى يتحرك الهواء المنساب عبره بسرعة أكبر، ويخلق ذلك فرقًا فى الضغط على جانبى السطح، وهذا الفرق فى الضغط ينتج بدوره قوة متجهة من ناحية الضغط الأعلى إلى الناحية ذات الضغط المنخفض، ويوضح شكل (١٠ – ٣) تولد قوى رفع الجسم الانسيابى الناجمة عن الفرق فى الضغط.



شكل (١٠ – ٢)

القيم النسبية لقوتى الرفع والسحب لجسم ذى أركان وجسم وانسيابى



شكل (١٠ – ٣)

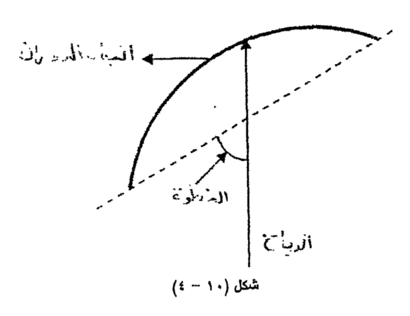
كيف يولد السطح الانسيابى قوة الرفع

تصميم الجزء الدوار:

من المفيد حتى نستوعب أثر الاختلافات فى تصميم الجزء الدوار، أن نصف كيف يكون رد فعل ريش الجزء الدوار إزاء الرياح، وأن نعرف بعض عوامل التصميم المعيارى.

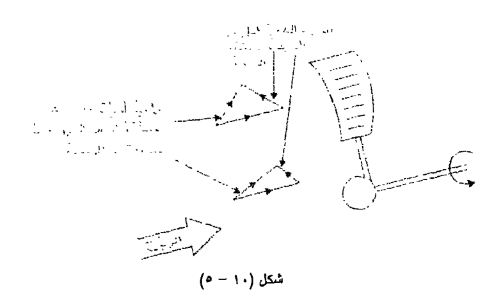
الخطوة **Pitch**:

تأخذ ريشات العضو الدوار شكلا منحنيًا حتى تحرف مسار الرياح، كما هو موضح بشكل (١٠–٣) وتسبب قوى الرفع المتولدة دوران العضو الدوار، ولكى نحصل على أقصى قدر من قوى الرفع ينبغى أن تركب الريشات بالزاوية المناسبة الصحيحة بالنسبة لاتجاه الرياح، وهى ما يطلق عليها الخطوة **Pitch** (شكل ١٠ – ٤)، وبما أن أطراف الريش تتحرك أسرع من النقاط الأقرب إلى المحور، فإن زاوية الرياح (وكما ترى من منظور الريشة) تتغير مع تغير نصف القطر (شكل ١٠ – ٥).



شكل (١٠ – ٤)

رسم بيانى تخطيطى يبين زاوية الخطوة لريشة الجزء الدوار



شكل (١٠ – ٥)

تغير خطوة الريشة بتغير نصف القطر

ويكون للجزء الدوار أقصى كفاءة إذا كانت هذه الزاوية من منظور الريشة أكبر بقدر الإمكان، بشرط ألا تزيد عما يسبب التوقف المفاجئ **stalls** للجزء الدوار، ولزيادة الزاوية على طول الريشة ينبغى تقويس سطح الأخيرة، ولذات السبب ولجزء دوار مصمم ليدور بسرعة – كتوربين رياحى ذى ريشتين أو ثلاث – تركب ريشاته على خطوة أصغر.

نسبة الإشغال solidity:

تعرف (نسبة الإشغال) عادة بالنسبة التى تشغلها ريشات الجزء الدوار من محيطه الكلى، فعلى سبيل المثال إذا كان لجزء دوار قطره ٦ متر ٢٤ ريشة، يبلغ عرض كل منها ٠,٣٥ متر، فله إشغال نسبته

$$= \frac{٢٤ \times ٠,٣٥}{ط \times ٦} \times ١٠٠ = ٤٥\%$$

وبعبارة أخرى يعنى الإشغال الكسر من مساحة الجزء الدوار التى يشغلها المعدن.

والمعادلة العامة لنسبة الإشغال هى:

الإشغال % = (٣١,٨ × عدد الريشات × عرض الريشة) ÷ قطـــر الجـــزء الدوار

وكلما زادت نسبة الإشغال، قلت سرعة الـــدروان التـــى يحتاجهـــا الـــدوار لمواجهة الرياح، فتوربين الرياح ذو الريشتين أو الثلاث له نسبة إشغال منخفـــضة ومن ثم يحتاج لدوران سريع لمواجهة الرياح، وإلا تعرض الكثير من طاقة الرياح للفقدان من جراء وجود فجوات كبيرة بين الريشات.

نسبة السرعة الطرفية:

ويقصد بها النسبة بين سرعة أطراف الريشة إلى سرعة الرياح، فعلى سبيل المثال إذا كانت سرعة الجزء الدوار ٢٠ لفة فى الدقيقة وكانت سرعة الرياح ٤ م/ث، فإن نسبة السرعة الطرفية هى:

$$\frac{\text{ط} \times ٦ \times ٢٠ \div ٦٠}{٤} = ١,٦$$

والمعادلة العامة هى:

نسبة السرعة الطرفية = (٠,٠٥٢ × قطر الجزء الدوار بـــالمتر × ســـرعة الدوران باللفة / دقيقة) ÷ سرعة الرياح م / ث.

فإذا كان الجزء المتحرك يدور بسرعة خطية أعلى من سرعة الرياح فـــإن نسبة سرعته الطرفية تتجاوز الواحد الصحيح، وعلى العكس من ذلك إذا كان يدور بسرعة خطية أقل من سرعة الرياح فتكون نسبة سرعته الطرفيـــة أقـــل مـــن ١، والدوار الذى يعتمد فى دورانه على قوى السحب مثل البانامونات(*) **panamones**

(*) انظر شكل (١٠ – ٩ جـ) (المترجم)

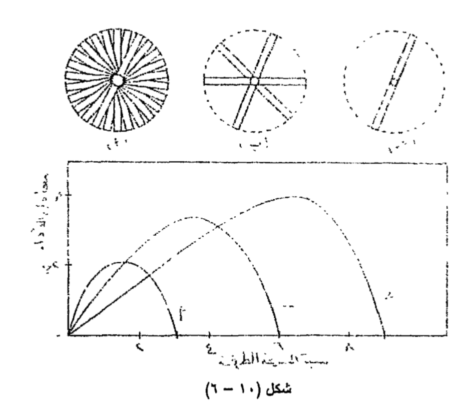
محال أن يدور بأسرع من سرعة الرياح، ودائمًا ما تقل نسبة سرعتها الطرفية عن ١. ولتوربينات الرياح ذات الريشتين أو الثلاث، والتى تدور بسرعات عالية، نسبة سرعة طرفية مرتفعة تتراوح بين ٣، ١٠. والدوارات متعددة الريشات والمناسبة لضخ الرياح تتراوح نسبة سرعتها الطرفية ما بين ١، ٢. ولكل دوار قيمة مثلى للسرعة الطرفية، تصل لديها كفاءته إلى حدها الأعلى.

معامل الأداء:

معامل أداء الجزء الدوار هو الكسر من قيمة طاقة الرياح المارة خلال قرصه، والذى يتحول إلى قدرة ينقلها محوره. وهو مقياس لكفاءة الدوار ويختلف تبعًا لنسبة السرعة الطرفية، وفى شكل (١٠ – ٦) علاقة نمطية بين السرعة الطرفية ومعامل الأداء، ولكل نوع من الدوارات رسم بيانى مميز لهذه العلاقة يختلف عن غيره.

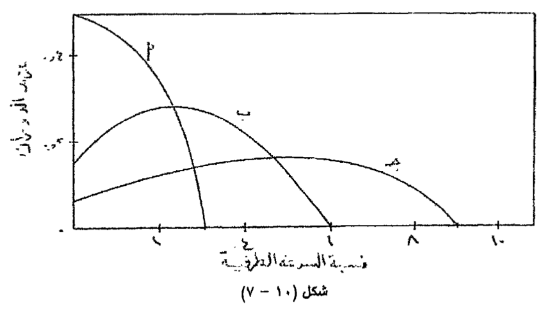
عزم الدوران:

عزم الدوران هو العزم المتولد فى الجزء الدوار، وهو يعتمد على (نسبة الإشغال) ونسبة السرعة الطرفية، فالدوارات ذات نسبة الإشغال العالية ونسبة السرعة الطرفية المتدنية (كدوارات مضخات الرياح متعددة الريشات) تولد عزوم دوران أعلى من تلك ذات نسب الإشغال المنخفضة والسرع العالية (كتوربينات الرياح)، وهو ما يوضحه شكل (١٠ – ٧) والملمح الجدير بالملاحظة هو أن الآلات ذات السرعات العالية لها معامل أداء أقصى يزيد قليلا ولكن لها عزم ابتداء **starting torque** منخفضًا، وعلى النقيض من ذلك يولد الدوار ذو نسبة إشغال عالية، عزما ابتدائيًا مرتفعًا إلا أن أقصى معامل أداء له يتدنى قليلاً.



شكل (١٠ – ٦)

منحنيات علاقة معامل الأداء بنسبة السرعة الطرفية لدوارات ذات نسب إشغال متنوعة



شكل (١٠ – ٧)

منحنيات تبين علاقة عزم الدوران بنسبة السرعة الطرفية لدوارات ذات نسب إشغال مختلفة

ويعتمد اختيار نوع الدوار على خواص الحمل المطلــوب، والمــضخة ذات الإزاحة الإيجابية **positive displacement pump** (كالمــضخات ذات الكباســات) المستعملة فى عمليات الثقب، تحتاج إلى عزم ابتدائى مرتفع عــن عــزم التــشغيل العادى، لذا فاستعمال دوار ذى نسبة إشغال عالية أمر جوهرى، ما لم تدمج طريقة ما لرفع الحمل عن الدوار لمعاونته أثناء بدء القيام، وعلــى أيــة حــال فمولــدات الكهرباء لا يلزمها عزم مرتفع لإدارتها ابتداءً، وإنما يحتاج أن تدار فى ســرعات عالية، ومن ثم يلزم لها عمومًا دوار ذو سرعة عالية ونسبة إشغال منخفضة ممــا يناسب مقتضيات الحمل المطلوب، ومضخات الإزاحة الإيجابية، والتى لا يــستعمل غيرها مع مضخات الرياح تحتاج إلى عزم ابتداء كــاف (عــال نــسبيًا)، إلا أن استمرار تشغيلها يحتاج لعزم أقل، وسيبقى دوار مضخة الرياح فى تــشغيله عنــد سرعة يتوافق لديها العزم المتولد بالضبط مع العزم اللازم للمضخة، ولهذا الــسبب تعود أهمية خصائص منحنى العزم فى مضخة الرياح، ولكى يتوفر عزم ابتــدائى مرتفع يلزم دوار ذو نسبة إشغال عالية.

لذا تصمم كل مضخات الرياح تقريبًا بنسبة إشغال عالية وبدوارات متعــددة الريش.

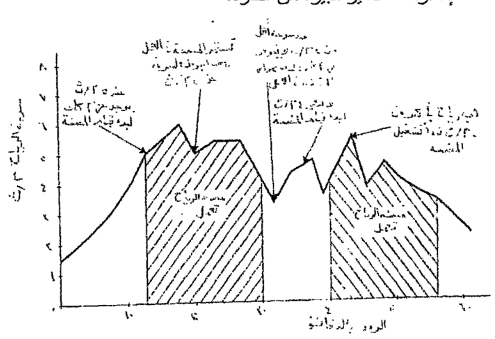
ويلزم للمضخة الترددية ذات الإزاحة الموجبة عزم ابتدائى لقيامها يــساوى تقريبًا ثلاثة أمثال العزم اللازم لدورانها التشغيلى المعتاد، ويعنى هذا أنه حتــى إذا عملت مضخة رياح عند سرعات رياح منخفضة، فإنها ستحتاج إلى دفقــة (هبــة) رياح ذات سرعة أعلى لقيامها فى البداية. ويبين شكل (١٠ – ٨) تخطيطًا للرســم البيانى لتأثير عزم الابتداء العالى على زمن تشغيل مضخة الرياح مع أمثلة رقمية.

التصميمات المختلفة للدوار:

تستعمل طواحين الهواء أفقية المحور ذات الريشتين أو الثلاث ريشات (شكل ١٠ – ٩ أ) فى توليد الكهرباء، إلا أنها لا تصلح للاستعمال مباشرة فى ضخ المياه للأسباب التالية:

١) ليس بمقدورها توليد عزم كاف لبدء قيام مضخة ذات كباس.

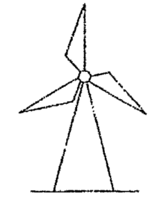
٢) تدور بسرعة تفوق كثيرًا ما يلزم للتشغيل المباشر لمضخة ترددية، كما يصعب تصنيع توربينات الرياح هذه، نظرًا للدقة الهندسية المتناهية المطلوبة لذلك، على أية حال فيمكن استعمالها بأسلوب غير مباشر لضخ المياه وذلك بتوليد الكهرباء ثم استعمال هذه الكهرباء فى إدارة المضخات وإذا كان هذا البديل مكلفًا إلا أنه قد يلائم بعض المواقع، أو إذا لزمت مقادير كبيرة من القدرة.



شكل (١٠ – ٨)

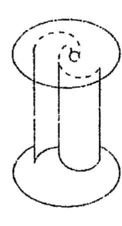
مثال عددى يوضح تأثير عزم الابتداء العالى على أداء مضخة رياح

وغالبًا ما تدار الدوارات السافونية(*) savonius rotors بفعل قوى السحب، أكثر من قوى الرفع، ومن هنا فهى لا تتسم بالكفاءة، كما تدور ببطء شديد (شكل ١٠ – ٩ب) وتدار البانامونات (شكل ١٠ – ٩جـ) بالكامل بفعل قوى سحب الرياح،وهى تعانى من ذات عيوب الدوارات السافونية، أما توربينات الرياح من نوع داريوس Darrius ذات التدفق العرضى Cross flow (شكل ١٠ – ٩ د) فتثير اهتمامًا متزايدًا، بيد أنها لا تناسب ضخ المياه حيث لا يمكنها بدء الحركة ذاتيًا فى المعتاد، وحتى إذا ما عدل تصميمها لتقوى على بدء الحركة ذاتيًا فليس باستطاعها توليد عزم كاف لبدء تشغيل مضخة، كما تصعب حمايتها من التلف بفعل العواصف ولم يتم حتى الآن تصنيعها بتكاليف تقل عن تكاليف الدوارات ذات المحور الأفقى.



شكل (١٠ – ٩ أ)

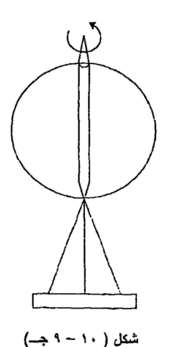
طاحونة هواء ذات ثلاث ريشات وبمحور أفقى



شكل (١٠ – ٩ ب)

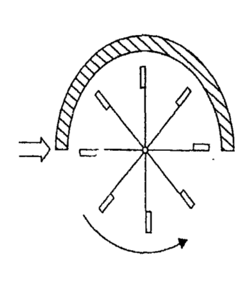
رسم تخطيطى لدوار سافونيس (مسقط جانبى)

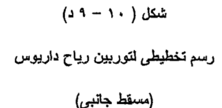
(*) الدوارات السافونية savonius rotors نوع من توربينات الرياح الرأسية لاستغلال طاقة الرياح اخترعها المهندس الفنلندى سافونيوس عام ١٩٢٢ (المترجم)



شكل (١٠ – ٩ جـ)

بانامون





شكل (١٠ – ٩ د)

رسم تخطيطى لتوربين رياح داريوس

(مسقط جانبى)

تقييم الموقع المناسب:

العوامل اللازم قياسها فيما يخص الرياح:

١ – متوسط سرعة الرياح على مدار السنة.

٢ – متوسط سرعة الرياح على مدى الشهر (لكل شهر على حدة).

٣ – التغير النمطى فى سرعة الرياح خلال اليوم الواحد (لكل شهر).

٤ – التوزيع السنوى لفترات خمود الرياح وامتداد كل منها.

٥ – أقصى سرعة لدفقات (هبات) الرياح العالية.

٦ – اتجاه الرياح.

وربما يصعب الحصول على بيانات رقمية لكل هذه المتغيرات، وعلى وجه الخصوص قد يعول فى تقييم البندين الرابع والخامس فيما سبق، على المقابلات مع سكان الموقع المحليين.

والنحو الأمثل هو أن تؤخذ قياسات هذه المعاملات فى الموقع المقترح، وعلى الارتفاع الملائم من سطح الأرض لفترة سنة على أقل تقدير، إلا أن هذه الإمكانية نادرة من الوجهة العملية، ويعول على البيانات المستقاة من المواقع القريبة، وينبغى حسبان التفاوت ما بين موقع أخذ القياسات، والموقع المأخوذ فى الاعتبار والجوانب المهمة فى هذه التفاوتات هى:

١) **شكل سطح الأرض:** كلما زادت وعورة سطح الأرض زادت معاوقة الريح، فالسطوح الوعرة تخلق اضطرابات فى طبقات الرياح فيما فوقها، ويوضح الجدول التالى المعامل الذى تؤثر به وعورة سطح الأرض على سرعة الرياح.

نوعية سطح الأرض	معامل سرعة الرياح عند الارتفاعات المختلفة		
	٦ متر	٩ متر	١٢ متر
سطوح مستوية (سطح الأرض – البحيرات – الرمال)	١,٤	١,٤٥	١,٥٠
سطح ذو وعورة متوسطة (شجيرات صغيرة وما إلى ذلك)	٠,٩٠	٠,٩٨	١,٠٥
سطوح وعرة (غابات – مبان – إلخ)	٠,٥٠	٠,٦٠	٠,٦٦

والمعادلة العامة لهذا المعامل هى:

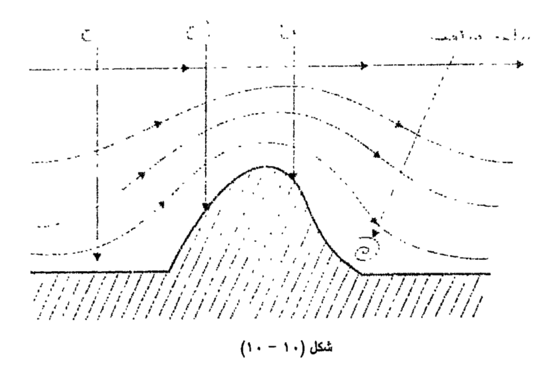
سرعة الرياح عند منطقة مقترحة بعينها = سرعة الرياح المعروفة فى نقطة أخرى × معامل المنطقة المقترحة ÷ معامل المنطقة المعروفة.

٢) **وجود تلال أو وديان أو سلسلة جبال:** تواجه التلال الدائرية والقمم وسلاسل الجبال عمومًا رياحا ذات سرعات أعلى وإن كانت متغيرة القيمة – مما تواجهه الأراضى المسطحة، وتزداد سرعة الرياح فوق التلال، وعلى أية حال فقد تتولد اضطرابات دوامية على الجانب الآخر من التل (شكل ١٠ – ١٠). ويعتمد مقدار التسارع الذى يحدث للرياح لدى مرورها على تل أو سلسلة جبال بشكل كبير على ارتفاع التل وهيئته، وليس بالإمكان تحديد معاملات لكل أنواع الجبال المختلفة، غير أن شكل (١٠ – ١٠) يعطى قيما تقارب الواقع ويمكن استعمالها فى الحصول على تقريب مقبول.

٣) **المناطق الساحلية:** قد تواجه المناطق الساحلية (حول البحيرات الواسعة وعلى مقربة من البحار) رياحًا عنيفة بأكثر من المناطق داخل البر، ومن الصعوبة بمكان تحديد الزيادة فى سرعة الرياح بسبب الوقوع قرب الساحل فى صورة رقمية.

وتتوفر البيانات عن سرعة الرياح عادة عند الموانئ والمرافئ، ولنسيم البحر عادة نمط يومى نتيجة فرق درجات الحرارة بين البحر والبر، وتهب الرياح على وجه العموم من البر فى اتجاه البحر نهارًا، ومن البحر فى اتجاه البر ليلاً(*).

(*) طبقا لما ورد بالنص المترجم (المترجم)



شكل (١٠ - ١٠)

رسم تخطيطى لمعامل تسارع الرياح التقريبى بفعل وجود تل فى طريقها

٤) الارتفاع عن سطح الأرض: تواجه الأراضى المرتفعة عادة رياحًا أشد من تلك التى تتعرض لها الأراضى المنخفضة.

قياسات عوامل الريح:

تتاح بدائل متعددة لقياس عوامل الرياح المختلفة، اعتمادًا على المدة الزمنية المتاحة والميزانية المتوفرة ودرجة الدقة اللازمة، فإذا لم يشكل الزمن أو المادة عائقًا ما، فبالإمكان الوصول إلى مستوى عال من الدقة، وعادة لا تكون هذه هى الحالة، ويتم الوصول إلى حلول وسطى، وإذا كانت هناك منظومات لاستغلال طاقة الرياح مقامة بالفعل فى مناطق قريبة، فإن خبرات الآخرين السابقة قد تمثل مرشدًا طيبًا ورخيصًا لاختيار الحجم الأمثل لمنظومة استغلال طاقة الرياح بأفضل من الاسترشاد بالقياسات، وإذا لم يكن قد سبق استعمال مثل هذه المنظومات من قبل،

فلابد من إجراء قياسات للريح أو تقديرها بناء على بيانات مـن مراكـز أرصـاد الطقس أو الطيران المدنى، وتتصب القياسـات اللازمـة علـى سـرعة الريـاح واتجاهها.

نوعية البيانات عن الرياح:

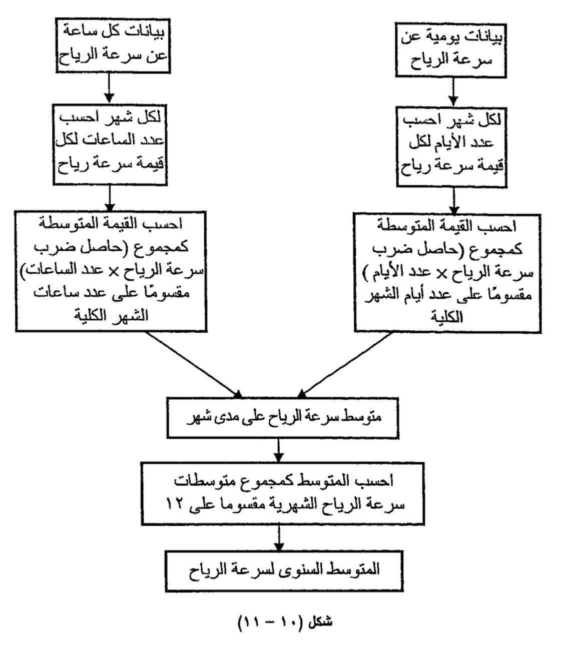
حتى وقت قريب للغاية، لم يكن هناك برنامج ممنهج لجمع البيانـات، فيمـا عدا لدى المطارات الرئيسية، حيث لابد من تجميع البيانـات طبقـا لمـا تقتـضيه الاتفاقات الدولية، ولذلك تجمع معظم البيانات لدى المطـارات باسـتعمال أجهـزة الرصد الدائم (المرياح **anemometer**) المركبة على ارتفاع ١٠ أمتار، وتلك هـى المواصفات القياسية لمحطات الأرصاد الجوية.

وقد يكون جهاز رصد الرياح (المرياح) غير دقيق أو موضوعًا فى موقـع غير ملائم وترجع العلة الرئيسية فى عدم الدقة إلى الاحتكاك الحادث فى كراسـى التحميل، والذى يفضى إلى دورانها ببطء أكثر من اللازم، وبالتبعية فلـو صـممت منظومة لاستغلال طاقة الرياح وحدد حجمها على أساس بيانات مشكوك فى دقتهـا ولو بدرجة ضئيلة، فاحتمال أن يكون حجم مكونات المنظومة أكبر مـن الـلازم، أكثر من احتمال تصميمها بأحجام أصغر من اللازم، ومن الأهمية كذلك ملاحظـة أن هناك – إلى جانب حالات الرياح التى يتم قياس مؤشراتها، هناك علـى الأقـل حالات بعددها لم يتم قياسها، بل يفوق عدد الحالات غير المقيسة فـى كثيـر مـن الأحيان ما قيس فعلا، ونظرًا للعلاقة التكعيبية بين القدرة المتولدة وسرعة الريـاح فمن شأن خطأ بسيط لا يتجاوز أجزاء من المائة أن ينجم عنه تقييم لمتوسط سرعة الرياح بأقل من القيمة الحقيقية قد يفضى إلى تقليل ضخم فى تقدير كميـة القـوى المحركة المتاح الحصول عليها منها.

بدائل القياس الممكنة:

١) استعمل البيانات عن الرياح المتاحة لدى أقرب محطة أرصاد جوية، وعدلها وفقًا لأية اختلافات فى وعورة السطح أو ارتفاعه عن سطح الأرض، وعلى أية حال، فقد لا تتواجد فى كثير من الأحوال محطة أرصاد على مقربة من الموقع المقترح تشييد منظومة استغلال الرياح فيه، وكقاعدة عامة ينبغى أن تقع محطة الأرصاد فى نطاق لا يبعد بأكثر من ٢٠ – ٦٠ ميلاً عن الموقع المقترح، وكلما زادت وعورة السطح صغر هذا النطاق.

وفى المناطق الريفية ذات التلال، لن تكون لبيانات محطة أرصاد قريبة أية درجة من الدقة، وفى محطات الأرصاد المحلية التى تستعمل بياناتها عن الرياح، يوصى بالتأكد من الارتفاع الموضوع عليه المرياح وحالته، ولكى تكون بيانات الرياح وسرعتها ذات جدوى فعلية فينبغى أن توجز فى متوسطات سرعة الرياح على مدى شهر، وغالبًا ما تكون البيانات على تلك الصورة، وفى غير هذه الحالة يتوجب تعديلها طبقا للخطوات المبينة بشكل (١٠ – ١١).



شكل (١٠ – ١١)

رسم تخطيطى لخطوات معالجة البيانات عن الرياح

٢) البديل الثانى هو الاعتماد على بيانات محدودة من واقع الموقع، فإذا كانت شدة الرياح من الوضوح بموضع ما فمن المستحسن – عند إجراء قياسات ميدانية للرياح لديه – مقارنة تكاليف إجراء هذه القياسات بالتكاليف المترتبة على سوء تقدير الحجم المناسب للمعدات، ومن الموصى به أن تتم القياسات الميدانية للرياح كل ساعة وعلى مدى ثلاثة أشهر على أقل تقدير، وإذا لم يكن أخذ القياسات كل ساعة فى حيز الإمكان، فلابد من تجميع البيانات عن قيم المتوسط اليومى، ثم مقارنتها ببيانات محطة الأرصاد عن نفس الفترة الزمنية باستخدام تحليل إحصائى قائم على أساس القيم المتوسطة على مدار اليوم والساعة، وبالتعرف على التفاوت ما بين البيانات الميدانية وبيانات محطة الأرصاد على مدى ثلاثة أشهر، يمكن تعديل بيانات محطة الأرصاد عن الشهور الأخرى للتنبؤ بسرعة الرياح فى الموقع.

٣) يتمثل البديل الثالث فى استقراء البيانات الميدانية، بأخذ القياسات على مدى سنة على الأقل، مع مناقشة قطان المنطقة المحليين، والتأكد من عدم وجود مواسم تهدأ فيها الرياح أو تهب بشكل استثنائى غير معتاد على مدار العام الذى أجريت خلاله القياسات.

القدرة المنتجة من توربين الرياح:

تعطى القدرة المنتجة من توربين الرياح بالعلاقة:

$$ق = ن\ (س،\ \omega،\ \beta)\ \frac{ح\ ث\ س^{٣}}{٢}$$

حيث تشير ن إلى الكسر من القدرة التى يستخلصها التوربين من تيار الرياح، وهى دالة فى سرعة الرياح والسرعة الزاوية للجزء الدوار ω وزاوية الخطوة β ، وكذلك فى شكل السطح الانسيابى وعدد الريشات، ولما كان للسطح

الانسيابى قيمة مثلى بالنسبة لقوى الرفع والسحب لكل قيمة مفردة لزاوية الالتقــاء γ، أو على نحو مكافئ – لقيمة معينة لسرعة الرياح النسبية، فالكسر (ن) لتوربين رياح ذى عدد ريشات ثابت، يدور بسرعة زاوية ثابتة، سيكون له هو الآخر قيمــة قصوى، تنقص إذا زادت أو قلت سرعة الرياح، وبالنــسبة للأشــكال الانــسيابية الدارجة، تقع القيمة القصوى عندما تصل النسبة بــين ســرعة الــريش الطرفيــة وسرعة الرياح إلى ما بين ٤، ٨.

ويتدخل – لدى اختيار عدد الريشات – العديد من العوامل: تكلفة الريــشات وأجزاء نقل الحركة، مقدار القدرة المقتنصة من الرياح وسرعة الــدوران، فالآلــة ذات الريشة المفردة ستقتنص كمية طاقة أقل مما تفعل آلة ذات ريشات متعددة، إلا أنها ستدور بسرعة زاوية أعلى، ولأن الدوار سيشغل المولد بسرعة تتراوح ما بين ١٥٠٠، ١٨٠٠ لفة / دقيقة لتوليد القدرة الكهربية عند تردد ٥٠ أو ٦٠ هرتز، فمن شأن سرعة زاوية أعلى للدوار أن تتيح استعمال أجزاء نقــل حركــة ذات نــسب تخفيض سرعات تروس أقل، وهى أخف وزنًا وأقل تكلفة وأقل فى الفاقد المهــدر من الوصلات اللازمة فى حالة دوار ذى سرعة زاوية أقل.

والآلة ذات ثلاث ريشات أكثر قدرة على اقتناص الطاقة من الرياح، وأكثــر استقرارًا من حيث توجيهها فى مهب الريح، إلا أنها أعلى كلفة من حيث الريــشات وأجزاء نقل الحركة.

ويبدأ توليد القدرة مع سرعة رياح قدرها ٣ أو ٤ م / ث (التى تبدأ عنــدها الحركة) والقدرة المعيارية القياسية ق ق **rated power** تنتج عنــد ١٠ م / ث، وإذا ما تجاوزت سرعة الرياح ٢٥ م / ث يتوقف التوربين عن العمل وقاية لـــه مـــن التلف، وتزيد القدرة المنتجة بنحو سبعة أضعاف إذا ما تضاعفت ســرعة الريــاح ويعنى هذا آلة ذات كفاءة مرتفعة.

وتصل أقصى قيمة لمعامل الأداء إلى ٠,٤٦ وذلك عند سرعة رياح ٨ م / ث تقريبًا، وهذه القيمة تبلغ حوالى ٧٨% من أقصى قيمة نظرية لهذا المعامل، وهى ٠,٥٩٣ وعلى ذلك فريش التوربين تكون فعلا ذات كفاءة عالية نسبيًا فى مدى ضيق من ظروف التشغيل، رغم أن مجالا رحبًا لتحسين الأداء يظل فى حيز الإمكان.

ويتحدد مردود القدرة المتوسطة ق م التى نحصل عليها من توربين الرياح للفترة الزمنية المعنية، بالقدرة الخارجة لدى سرعة ما للرياح مضروبة فى احتمالية حدوث هذه السرعة بعد إجراء عملية تكامل رياضى لها بالنسبة للسرعة عبر كل قيم سرعة الرياح الممكنة، ويمكن التعبير عن ذلك رياضيًا بالمعادلة:

ق م = ∫ع ق خ (ع) x د (ع) د ع.

وإذا ما عبرنا عن ق خ = ق ر x ج (ع)

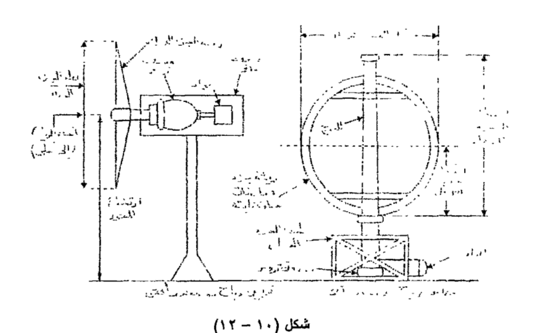
فتكون ق م = ق ر ∫ع ج (ع) x د (ع) د ع

والمقدار موضوع التكامل هو النسبة ما بين متوسط القدرة السنوية الخارجة إلى القدرة المعيارية ق ر للتوربين، ويعرف هذا المقدار بمعامل السعة **capacity factor**، وهو مؤشر مهم يتم استعماله لحساب تكلفة الطاقة التى نحصل عليها من توربينات الرياح.

توربينات الرياح:

هناك نوعان متمايزان من توربينات الرياح: الأول هو توربين الرياح ذو المحور الأفقى (**HAWT**)، والذى يكون محور دوران جزئه الدوار موازيًا لاتجاه تيار الرياح، والثانى هو توربين الرياح ذو المحور الرأسى (**VAWT**) والذى يكون محور دوران جزئه الدوار عموديًا على اتجاه سريان الرياح، والنوعان بينهما

الرسم التخطيطي في شكل (١٠ – ١٢)، ومبين بالشكل كيفية تشغيل النوع الأفقي بالرياح المتجهة من أعلى ومن أسفل، وتعمل أغلب الآلات الحديثة بالرياح المتجهة إلى أعلى، وذلك تجنبًا لأن يحجب البرج الرياح عن الريشات وهو ما يمكن أن يفضي إلى مستويات مزعجة من الضجيج ويزيد من الإجهادات المسلطة على الريشات، ومن الناحية العملية، يرتفع المحور بمقدار قطر الجزء الدوار تقريبًا، أما في النوع ذي المحور الرأسي فيوضع صندوق التروس والمولد عند مستوى الأرض مما يسهل من إجراء الصيانة الروتينية، إلا أن ذلك يعيق الإفادة من سرعات الرياح العالية ومن انخفاض اضطراباتها لدى الارتفاعات العالية.



شكل (١٠ – ١٢)

النوعان الأساسيان لتوربينات الرياح

وربما يثبت النوع ذو المحور الرأسي أفضلية من ناحية التكاليف، إلا أن استعماله محدود، فهو – على عكس النوع الأفقي لا يمكنه الإفادة من سرعات الرياح العالية ومن انخفاض تقلباتها لدى الارتفاعات العالية، ومن ثم فالأغلب الأعم من توربينات الرياح المستعملة اليوم ذات محور أفقي.

المنظومات الجانبية المساعدة لتوربينات الرياح:

يتكون توربين الرياح الحديث ذو المحور الأفقى من ست منظومات فرعية هى أساسًا:

١) الجزء الدوار: والذى يتركب من ريشة أو ريشتين أو ثلاث مركبة على سرة أو محور، وقد يشتمل على منظومة كبح ديناميكى لدى الارتفاعات العالية ووسائل تحكم فى الخطوة.

٢) أجزاء التشغيل أو الإدارة، وتتضمن صندوق التروس أو وسائل نقل الحركة، والنظم الهيدروليكية، وأعمدة الدوران ونظم الكبح وحجرة حماية الأجزاء المتحركة التى تحيط بأجزاء التوربين.

٣) منظومة لتعديل اتجاه الدوار بحيث يكون متعامدًا مع اتجاه سريان الرياح.

٤) الأجزاء الكهربية والإلكترونية، والتى تشمل المولد، والمرحلات **relays**، وأنظمة فصل الدوائر الكهربية، والكوابل المتدلية، والتوصيلات السلكية، ومنظومات التحكم والإلكترونيات، والمحسات.

٥) البرج.

٦) منظومة ضمان استقرار المحطة التى تشمل الطرق، ووسائل تدعيم الأرضية ومعدات التوصيل ما بين الأجزاء.

الجزء الدوار:

والدوار الذى يقوم بتحويل طاقة الرياح الحركية إلى طاقة دورانية هو الجزء المتميز والحرج فى توربين الرياح، فهو يتعرض لقوة الرياح بأكملها

ولكامل نطاق التغير فى سرعتها واتجاهها والاضطراب فى مقدارها وقصها shear (وهو التغير فى سرعة الرياح مع تغير المنسوب).

ويمكن توصيف الدوار بأنه جسم جاسئ ذو خطوة ثابتة (أو متغيرة يتحكم فيها عن طريق مقصورة خاصة)، للحد من أقصى قيمة للقدرة المنتجة من التوربين مع خطوة ثابتة أو متغيرة، ويستعمل الجزء الدوار كذلك للتحكم فى مقدار الطاقة المستخلصة من تيار الريح، وعادة ما تستخدم أجزاء دوارة بريشات ذات خطوة متغيرة أو ريشات يتم التحكم فيها عن طريق مقصورة خاصة، ومع الخطوة المتغيرة يغير دوران الريشة حول محور ما على امتداد طولها، من زاوية الخطوة وبالتبعية من قوى الرفع والسحب المؤثرة على الريشة، ولا تحد الخطوة المتغيرة فقط من القيمة القصوى من الطاقة المقتنصة ولكنها تقلل بالمثل من السرعة اللازمة لبدء الحركة وتوفر وسيلة لكبح حركة التوربين بوسيلة أيروديناميكية (عن طريق الديناميكا الهوائية).

مجموعة توصيل الحركة:

أهم أجزاء مجموعة توصيل الحركة أعمدة السرعات العالية والبطيئة، ونظام كبح الحركة الميكانيكى، والكراسى وصندوق التروس أو النقل، والغطاء الخارجى، وتزيد تروس مجموعة التوصيل من سرعة الجزء الدوار الدورانية والتى تصل عادة من ٠,٥ إلى ٢ هيرتز (من ٣٠ إلى ١٢٠ لفة / دقيقة) لتصل إلى سرعة دورانية، للعمود الخارجى مقدارها ٢٠ إلى ٣٠ هيرتز (من ١٢٠٠ إلى ١٨٠٠ لفة / دقيقة) وهى اللازمة لأغلب المولدات لتوليد القوة المحركة لدى تردد ما بين ٥٠ إلى ٦٠ هيرتز.

جهاز التحكم فى الاتجاه:

تصنف توربينات الرياح الأفقية إلى فئتين: توربينات تندفع فيها الرياح إلــى أعلى (حيث يقابل تيار الرياح الجزء الدوار أولا) أو توربينات تندفع فيها الريــاح لأسفل (حيث يلاقى تيار الرياح البرج أولا) وتستعمل أجهزة التحكم فــى توجيــه مستوى الدوار بحيث يتعامد مع اتجاه هبوب الرياح.

المنظومات الكهربية:

لكل توربينات الرياح الحديثة تقريبًا مولدات تعمل بالحث، تتكون من هيكــل ثابت ذى لفات من الأسلاك، وجزء دوار للمولد، وتتباين القدرة المحركة المنتجــة من هذا النوع من المولدات بسرعة مع تغير الفرق ما بين تردد الخــط والــسرعة الزاوية لدوار المولد، وتصل القدرة المنتجة لقيمتها القصوى عندما يبلغ هذا الفــرق أجزاءً من المائة فوق تردد الخط، وبهذا فإن السرعة الزاوية لدوار المولد محكومة بتردد الخط.

الموقف الحالى لاستغلال طاقة الرياح بالهند وآفاقه المستقبلية:

بعد ثلاث سنوات من تأسيس "إدارة مصادر الطاقة غيــر التقليديــة" عــام ١٩٨٥، بدىء فى إنجاز برنامج قومى لاستغلال طاقة الرياح، وكان أحــد بــرامج الوزارة الحالية لمصادر الطاقة غير التقليدية (التى تشكلت عام ١٩٩٢) هو برنامج "تقييم مصادر الرياح"، فنشطت جهود مسح الرياح ورصدها بعرض البلاد جميعها، بهدف قياس سرعات الرياح فى مواقع مختارة بمختلف الولايــات، وتقيــيم مــدى التغير الموسمى والسنوى، وبحلول ٣١ ديسمبر ١٩٩٢، كان هنــاك ٢٥١ محطــة لمسح الرياح تباشر عملها فى ١٦ ولاية والمناطق الاتحادية فــى جــزر أنــدامان ونيكوبار وفى لاكشاد ويب، على حين يبلغ إجمالى عــدد المحطــات المــستهدف إقامتها ٤٧٠ محطة، وبالمثل هناك ٨٨ محطة مراقبة رياح تباشر عملها فــى ١٠ ولايات والمناطق الاتحادية فى جزر أندامان ونيكوبار ضمن عدد كلى مــستهدف يبلغ ١٣٦ محطة:

جدول (١٠-١)

محطات رصد الرياح ومسحها (بالهند) فى ٣١ ديسمبر ١٩٩٢

رقم مسلسل	الولاية أو المنطقة الاتحادية	عدد محطات رصد الرياح	عند محطات مسح الرياح
١	جوجارات	١٦	٣٠
٢	تاميل نادو	٢٠	–
٣	راجستهان	٧	١٧
٤	كارناتاكا	٨	–
٥	ماهاراشترا	٦	٣٠
٦	أندهرا براديش	٧	٢
٧	كيرالا	٩	٣٠
٨	أوريسا	–	٣٠
٩	مادهيابراديش	٥	–
١٠	لاكاشاد ويب	٥	–
١١	أندامان ونيكوبار	٥	–
١٢	هيما تشال براديش	–	٣٠
١٣	ميجهالايا	–	٧
١٤	أوتار براديش	–	٣٠
١٥	تريبورا	–	٩
١٦	البنغال الغربية	–	٦
١٧	أسام	–	٢٧
١٨	بيهار	–	٣
	الإجمالى	٨٨	٢٥١

ولقد أمكن بالتقييم الذى تم حتى الآن – التعرف على ٥٣ موقعًا سجل فيهــا متوسط سرعة رياح سنوى يتخطى حد ١٨ كم / ساعة، وتتوزع هذه المواقع على سبع ولايات:

(جدول ١٠-٢)

المواقع التى تتعرض لمتوسط سرعة رياح تتعدى ١٨ كم / ساعة على مدار السنة بالهند

م	الولاية أو المنطقة الاتحادية	متوسط سرعة الرياح السنوى كم /س	م	الولاية أو المنطقة الاتحادية	متوسط سرعة الرياح السنوى كم /س
	<u>تاميل نادو</u>			<u>لاكاشادويب</u>	
١	سلطان بيت	١٩,٠	١	أجاتى	١٨,٠
٢	بولا فادى	٢١,٢		<u>كارناتاكا</u>	
٣	أند يياتى	١٩,١	١	جوكاك	١٩,٤
٤	كاياتهار	٢٠,٣	٢	مالجاتى	١٩,٢
٥	موباندال	٢٥,٥	٣	كانامساجار	٢٠,١
٦	سيمباجارا مانبودور	٢١,٧	٤	جوجيماتى	٣٠,٩
٧	بوليبيا نكولام	١٨,٩	٥	بوماناهالى	١٨,٧
٨	آلاجيا باندييا بورام	٢١,٤	٦	هانومانهاتى	٢٠,٤
٩	تالا ياتهو	٢٠,٨	٧	تلال بى بى	٢٧,١
١٠	آييكودو	٢١,٤		<u>آندهرا براديش</u>	

١١	كاتاديمالاى	٢٣,٩	١	تيرو مالا	٢٠,٤
١٢	راميسوارام	٢٤,٣	٢	بايا لاكونتلا	٢٠,٥
١٣	كيتهانور	٢٢,٧	٣	ناراسيمها كوندا	٢٠,٢
١٤	مينوكاداى	١٨,٤	٤	كاكولا كوندا	٢٤,٠
١٥	بونجالور	٢٠,٦	٥	سد إم بى آر	٢٠,٠
١٦	آراسا مبالايام	٢١,٤	٦	راما جيرى (١)	١٩,٧
١٧	إيديار بالايام	٢٣,٤	٧	بهيمو نيباتنام	١٩,١
١٨	أوتابيدارام	١٨,٢	٨	راما جيرى (٣)	١٨,٣
	جوجارات			**كيرالا**	
١	هارشاد	٢٠,٠	١	كانجيكودى	٢٢,٣
٢	أوكها	١٩,٤	٢	كوتاتهارا	١٩,٥
٣	موندرا	١٩,٤	٣	كوتامالا	١٨,٤
٤	سوراجبارى	١٩,٩	٤	بونمودى	١٩,٧
٥	أوكهامادهى	١٩,٠	٥	راما كالميدو	٣٠,٤
٦	نافى باندر	١٩,٩		**ماهارا شترا**	
٧	دهانك -١	٢٤,٢	١	فيجا يا دورج	١٩,٦
٨	دهانك -٢	٢٤,٩	٢	بانشجانى	١٨,٢
٩	دوكما	١٩,٢	٣	تشاليكوادى	١٩,٩
١٠	كاليانبور	٢١,٩			
١١	باما نبورى(٢)	٢٠,٥			

المصدر: التقرير السنوى لوزارة "مصادر الطاقة غير التقليدية لعام ١٩٩٢ – ١٩٩٣".

وينظر إلى المواقع الواردة بجدول (١٠-٢) كأماكن مأمولة لإقامة مـزارع رياح ذات سعات كبيرة وتنميتها.

وتحت مظلة برنامج طموح أقيمت مجموعة من مضخات تعمل بالرياح وشاحنات بطاريات بالرياح، ومولدات كهربية مستقلة بذاتها تعمل بالرياح، ومزارع وسلسلة من المولدات الكهربية تغذى الشبكة العمومية بالكهرباء وذلك للتدليل على قدرة هذه التقنية.

وقد أقيمت بالفعل حتى وقتنا الراهن أكثر من ٣٠٠٠ مضخة بالرياح تشغل بالفعل فى مواقعها، وأغلب هذه المضخات من الطراز (PU500 12) وتستعمل المضخات التى تعمل بالهواء فى تلبية احتياجات مختلف التطبيقات كالرى ومياه الشرب، وأحواض الحصول على الملح من البحر، وزراعة البساتين وما إلى ذلك، ويوضح الجدول (١٠ – ٣) موقف المضخات التى تعمل بالرياح فى الآبار العميقة والموصلة بمضخات تروس فى ٣١ ديسمبر ١٩٩٣:

جدول (١٠-٣)

المضخات ذات التروس التى تعمل بالرياح

رقم مسلسل	اسم الولاية	عدد المضخات التى أقيمت		عدد المضخات تحت الإنشاء
		حتى ٣١ ديسمبر ١٩٩٢	حتى ٣١ ديسمبر ١٩٩٣	
١	أندهرا براديش	١٠	١٠	–
٢	جوجارات	١٠	٢٠	١٠
٣	كارناتاكا	٢٠	٢٠	–
٤	كيرالا	١٥	٢٠	–

٥	مادهيابراديش	١٠	١٩	١
٦	ماهاراشترا	٢٣	٣٠	—
٧	راجا ستهان	١٩	١٩	١
٨	تاميل نادو	٦٠	٦٠	—
٩	أوتاربراديش	٥	٢٠	—
	الإجمالى	١٧٢	٢١٨	١٢

المصدر: وزارة مصادر الطاقة غير التقليدية – التقرير السنوى لعام ١٩٩٢ – ١٩٩٣

وقد أقيم حتى الآن ما يربو على ١٢٠ شاحنة بطارية تعمل بالرياح وبسعات تتراوح ما بين ٥٠ وات، ٤ كيلو وات، ونحو ١٧٥ مولدات كهرباء مستقلة بذاتها وتعمل بالرياح بسعات بين ١٠، ٢٥ كيلو وات، وفى الوقت الراهن أقيمت مزارع رياح بقدرة ٨٠ ميجاوات فى ثمان ولايات، وتتبع نصف هذه المزارع القطاع الخاص، ويوضح جدول (١٠–٤) موقف مشاريع مزارع الرياح:

جدول (١٠–٤)

بيان مزارع الرياح وتوزيعها بين الولايات (بالهند)

رقم مسلسل	الموقع	القدرة المركبة فعلا ميجاوات	القدرات تحت الإنشاء بالميجاوات
جوجارات			
١	لامبا	١٠,٠٠٠	٠,٢٠٠
٢	أوكهامادهى	٣,٣٠٠	—
٣	ماندفى	١,٤٩٠	—
٤	أوكها	٠,٦٠٥	٠,٤٩٥

٥	تونا	٠,٦٩٥	–
٦	دهانك	–	٢,٠٠٠
	الإجمالى	١٦,٠٩٠	٢,٦٩٥
تاميل نادو			
١	كاياتهار	١٠,٣٠٠	–
٢	موبندال	٤,٠٠٠	–
٣	توتيكورين	١,١٥٥	–
٤	بوليبا نكولام	١,٥٩٠	–
٥	كيتهانور	٠,٢٢٠	٢,٠٠٠
٦	الطريق السريع الوطنى رقم ٧	٠,٢٢٠	–
	الإجمالى	١٧,٢٦٥	٢,٠٠٠
ماهاراشترا			
١	ديوجاره	١,١٠٠	–
٢	فيجايادورج	–	١,٥٠٠
	الإجمالى	١,١٠٠	١,٥٠٠
آندهرابراديش			
١	تيرومالا	٠,٥٥٠	٠,٥٠٠
٢	راماجيرى	–	٢,٠٠٠
	الإجمالى	٠,٥٥٠	٢,٥٠٠
أوريسا			
١	بورى	١,١٠٠	–

كاراناتاكا			
١	تالاكاوفيرى	٠,٥٥٠	—
٢	كاتبتا جودا	—	٢,٠٠
	الإجمالى	٠,٥٥٠	٢,٠٠
مادهيابراديش			
١	كهيدا	٠,٥٩٠	—
كيرالا			
١	كانجيكودى	—	٢,٠٠٠
	الإجمالى الشامل	**٣٧,٢٤٥**	**٢,٦٩٥(*)**

المصدر: وزارة مصادر الطاقة غير التقليدية – التقرير السنوى ١٩٩٢ – ١٩٩٣

(*) الرقم كما ورد بالأصل وصحته ١٢,٦٩٥ (المترجم)

جدول (١٠-٥)

البرنامج القومى لاستغلال طاقة الرياح

المشروعات (الحكومية):

القدرة المركبة	٣٧,٨٢ ميجاوات
الطاقة المولدة خلال عام ١٩٩٢ - ١٩٩٣ (حتى ٣١ ديسمبر ١٩٩٢)	٤٢ مليون كيلو وات ساعة
الطاقة المولدة التراكمية (المجمعة) حتى ٣١ ديسمبر ١٩٩٢	١٥٦ مليون كيلو وات ساعة
قدرات تحت التنفيذ	١٢,٧ ميجاوات
مشروعات القطاع الخاص:	
القدرات المركبة (فى تاميل نادو)	٧,٥٢ ميجاوات
القدرة المولدة خلال عام ١٩٩٢ - ١٩٩٣ (حتى ٣١ ديسمبر ١٩٩٢)	١١ مليون كيلو وات ساعة
القدرة المولدة التراكمية (المجمعة)	٢٢ مليون كيلو وات ساعة
مشروعات مخطط لها فى تاميل نادو	٤١,٢٥ ميجاوات
فى كارانتاكا	٢٤,٠٠ ميجاوات
درجة إتاحية المولدات الكهربية المشغلة بالرياح	%٩٥

المصدر: وزارة مصادر الطاقة غير التقليدية - التقرير السنوى ١٩٩٢ - ١٩٩٣

استغلال طاقة الرياح:

ينتشر فى الوقت الحالى فى كثير من مناطق العالم بما فى ذلك الهند استخدام طواحين الهواء الصغيرة ذات الحركة الميكانيكية المباشـرة والمقترنـة بمـضخة

ومستودع تخزين، ويمثل هذا آفاقًا مستقبلية لضخ المياه لأغـراض الـرى وميـاه الشرب وغير ذلك، فى المناطق الريفيـة ذات سـرعات الريـاح المتوسـطة أو المنخفضة وعلى وجه الخصوص فى البلدان النامية، ولقـد تطـور العديـد مـن تصميمات طواحين الهواء متعددة الريشات والمكونة بالكامل من المعدن، وشـأنها شأن طواحين الهواء متعددة الريشات التقليدية فلها عزم دوران ابتدائى طيب ولكنها أخف وزنًا وأيسر فى تصنيعها ولها كفاءة أعلى قليلا، ولقد طورت بالمثل طواحين هواء شراعية حديثة الطراز فى كثير من البلدان من ضمنها الهند، وهنـاك تحـت التنفيذ بالهند برنامج حكومى لضخ المياه بالرياح يشمل البلاد كلهـا، وقـد جـرت بالفعل إقامة أكثر من ٢٠٠٠ مضخة رياح، ويوفر البرنامج معلومات غايـة فـى الأهمية عن التطورات التكنولوجية المستحدثة، كما يشجع بصورة محمودة تبـادل المعلومات والتوسع فى البرنامج بحيث يتيح استغلالا على نطاق أوسع للرياح فـى مواقع بعينها.

وطاقة الرياح هى صورة عالية الجودة من الطاقة الميكانيكية التـى يمكـن تحويلها لطاقة كهربية مع الحد الأدنى من الفاقد فى الطاقة، وحيث إن الجزء الدوار من طاحونة الهواء يتحرك بصورة دورية (بمعدل دورة فى كل ثانية تقريبًا) فـإن القدرة المولدة تحصل فى صورة تيار متغير، إما باستخدام صندوق تروس وتثبيت سرعة الدوران أو بالسماح بالتغير فى السرعة مع تحويل القدرة الكهربية المولـدة إلى التردد اللازم بوسيلة إلكترونية.

وتتراوح الاستخدامات ما بين استعمالات على نطاق صغير فى المجتمعـات الريفية والنائية، ومرتبطة بمحطات قوى أخرى، إلى توليد للكهرباء علـى نطـاق كبير، تغذى بعده فى شبكة المرافق العامة، وبالنسبة للوحدات القائمة بـذاتها تلـزم منظومة من وحدة ديزل احتياطية وبطارية تخزين طاقة لضمان استمرارية الإمداد فى خلال فترات هدوء الرياح، ويمكن استغلال الرياح بالمثل فى شحن البطاريـات

باستخدام مولدات كهربائية من نوع التيار المستمر غير ذات الفرش **brushless** لإمداد المناطق المنعزلة بالقدرة الكهربية، وكذلك محطات الأرصاد الجوية والمساعدة فى شئون الملاحة والاتصالات وما شابه، والمنظومات المستقلة القائمة بذاتها، وشاحنات البطاريات التى تعمل بالرياح تنصب حاليًا فى مختلف مناطق الهند، وتستغل فى تطبيقات متنوعة.

ولقد وقع تطوير ملموس فى نحو ١٧٠٠٠ مولد كهربائى يعمل بالرياح فى ولاية كاليفورنيا بالولايات المتحدة، وتنتج هذه المولدات أكثر من ١٤٠٠ ميجاوات من القدرة المحركة التى تستخدم فى مختلف المرافق، ولقد تيسر ذلك من خلال مفهوم "مزرعة الرياح" أو "بستان الرياح" الذى يشير إلى استغلال عدد من مولدات الكهرباء الرياحية فى شكل مجموعة وحدات لتوليد القدرة ودمجها فى شبكة موحدة، ومع نهاية عام ١٩٨٧ كما ذكر سابقًا انتجت هذه المولدات ١٤٠٠ ميجاوات، وقد بدأ بالفعل برنامج لتوصيل القدرة المولدة من الرياح بالشبكة العمومية فى بعض الأقطار الأوروبية كالدانمارك وهولندا وألمانيا والمملكة المتحدة وسواها.

وقد بدأ برنامج المزارع الرياحية الحكومية بالهند عام ١٩٨٥، حيث بلغت القدرة المركبة حوالى ٨ ميجاوات فى بحر عام ونصف منذ يونيو ١٩٨٦، وقد شمل ذلك إقامة سبعة مشروعات لمزارع الرياح إجمالى قدراتها ٦,٨٥ ميجاوات موزعة على ١١٠ آلة تقع فى أوكها وماندفى بولاية جوجارات، وفى توتيكورين وكاياتار بتاميل نادو، وبورى بأوريسا، وديوجاره بما هاراشترا، وتالكايفيرى بكارناتاكا، وفيما عدا بعض المصاعب الفرعية، فقد حققت هذه المشروعات نتائج طيبة.

التكلفة النمطية لإنتاج الطاقة من الرياح (فى الهند):

عادة ما تتم مقارنة تكلفة منظومات المضخات الرياحية، بالمضخات العاملة بالديزل، وعلى أسس معينة مفترضة فيما يخص التكلفة الرأسمالية وتكلفة الصيانة السنوية. والإهلاك، وأسعار الفائدة، فقد حسبت تكلفة المتر المكعب الواحد من الماء الذى يضخه كل من الأسلوبين لمنظومة نمطية للضخ بالرياح مثل الطراز **PU – 500 – 12** على أساس الخبرة الميدانية العملية فى الهند، فلمنظومة تكلفتها ٢١٠٠٠ روبية هندية (نحو ١٥٠٠ دولار)، قادرة على ضخ ٢٠٠٠٠ م٣ من الماء سنويا تحت ساقط مياه قدره ٦ م وسرعة رياح متوسطها ١٠ – ١٢ كم /س، تبلغ تكلفة ضخ المياه ٢٣,٥ بريز(*) لكل م (١,٥ سنت أمريكى لكل م)، ومقابل ذلك تصل تكلفة ضخ المياه باستعمال وحدة ديزل قدرتها ٥ حصان تعمل لمدة ١٥٠٠ ساعة فى العام ولنفس السعة السنوية الكلية ونفس الساقط، إلى ٤٢,٥ بريز/ م(**) (نحو ٢,٨ سنت أمريكى لكل م)(***) والمقارنة بالمضخات التى تشغل بالكهرباء تبين بالمثل أن ضخ المياه بقدرة الرياح وتحت ظروف رياح مواتية تقل عن التكلفة فى حالة المضخات الكهربية.

وتتضمن اقتصاديات توربينات الرياح إدخال عامل اقتصاديات الحجم، بما يعنى أن معدل توليد الطاقة يتناسب مع المساحة الممسوحة ومكعب سرعة الرياح، وبالعكس... تعنى زيادة الحجم زيادة التعقدات والتراكيبات التقنية، ومتوسط التكلفة الرأسمالية، وتكلفة توليد الطاقة للمشروعات ذات السعة ١ ميجاوات المنفذة فى الهند حتى الآن تتراوح ما بين ١,٥، ١,٧٥ كرور(****) **Crores** روبية لكل

(*) البريز **Praise**: عملة هندية تعادل ٠,٠٦٦ سنت أمريكى تقريبًا (المترجم)

(**) كما ورد بالأصل.

(***) كما ورد بالأصل.

(****) الكرور فى نظام الأعداد الهندى عدد يساوى ١٠ ملايين (المترجم)

ميجاوات، ١,٢٥، ١,٥٠ روبية لكل كيلو وات ساعة على الترتيب، اعتمادًا على الموقع، وتتراوح تكلفة توليد الطاقة المخطط لها لمزارع الرياح المقترحة ذات السعة ٥ – ١٠ ميجاوات ما بين ٠,٧٩، ١,٠٤ روبية / كيلو وات ساعة، ولمزارع الرياح الأكبر حجمًا تقل تكاليف توليد الطاقة أكثر، وتقف هذه التكلفة على مستوى المقارنة مع تلك الخاصة بتوليد الطاقة حراريًا وتقل عن تكلفة توليد القدرة من وحدات الديزل، وعلاة على ذلك ففى حين أن تكلفة توليد الطاقة حراريًا ستوالى الارتفاع، مع توالى الزيادة فى أسعار الوقود، ستميل تكاليف توليد الطاقة بالرياح إلى التقلص أكثر وأكثر مع التحسينات المدخلة على تقنيتها، ومع استكشاف مواقع ذات سرعات رياح أعلى، وكذلك مع زيادة حجم مشروعات مزارع الرياح.

الباب الحادى عشر

الطاقة من المصادر الحيوية

مقدمة:

طالما استخدم الناس الطاقة الشمسية المستمدة من مصادر حيوية لأغـراض الطهى والتسخين.

وحتى اليوم فإن الأغراض الغالبة على استخدام خشب الوقود فى العالم هى الطهى والتسخين فى المناطق الريفية من البلاد النامية، وتمثل الطاقة من المصادر الحيوية حوالى ١٥% من الطاقة المستهلكة على مستوى العالم، ٣٨ % من مجمل استخدامات الطاقة فى البلاد النامية (انظر شكل ١١ – ١)، وإن كانت الكفاءة تعوز معظم عمليات استغلال الطاقة من المصادر الحيوية.

الغاز الطبيعي ١٧,٤٪
نووية ٤,١٪
مائية ٥,٥٪
مصادر حيوية ١٤,٧٪
الفحم ٢٤,١٪
النفط ٣٤,١٪

إجمالى العالم = ٣٧٣ إكساجول(*)
الطاقة المستهلكة للفرد = ٧٧ جيجاجول
التعداد = ٤,٨٧ بليون نسمة

شكل (١١ – ١ أ)
توزيع مصادر الطاقة الأولية عام ١٩٨٥
لإجمالى العالم

الغاز الطبيعي ٢٢,٧٪
نووية ٦,٩٪
مائية ٥,٧٪
حيوية ٢,٨٪
الفحم ٢٤,٥
النفط ٣٨,٢٪

إجمالى الطاقة المستهلكة = ٢٤٧ إكساجول
(٦٦% من إجمالى العالم)
استهلاك الفرد من الطاقة = ٢٠٢ جيجا جول
التعداد = ١,٢٢ بليون نسمة

شكل (١١ – ١ ب)
توزيع مصادر الطاقة الأولية عام ١٩٨٥
للبلاد الصناعية



إجمالى الطاقة المستهلكة = ١٢٦ إكساجول
(٣٤% من إجمالى العالم)
استهلاك الفرد من الطاقة = ٣٥ جيجاجول
التعداد = ٣,٦٥ بليون نسمة

شكل (١١ – ١ ج)
توزيع مصادر الطاقة الأولية عام ١٩٨٥
للبلاد النامية

شكل (١١ – ١)
توزيع مصادر الطاقة الأولية عام ١٩٨٥

(*) ١ إكساجول = ١٠ [١٨] جول (المترجم)
١ جيجاجول = ١٠ [٩] جول (المترجم)

وتشير منظمات التغذية والزراعة التابعة للأمم المتحدة إلى أن الطاقة من المصادر الحيوية يتم استهلاكها بمعدل يصل إلى زهاء ٢٠ إكساجول على مستوى العالم فى السنة، وهو ما لا يصل إلى ٦% من الاستهلاك الكلى للطاقة، على أية حال، فإن المسح التفصيلى فى كثير من البلدان يومئ إلى نسب مئوية أعلى، وتشير أفضل التقديرات إلى أن الطاقة من مصادر حيوية تستهلك بالفعل بمعدل ٥٥ إكساجول فى العام، أى ١٥% من استهلاك الطاقة عالميًا.

ومصادر الطاقة الحيوية هى السائدة فى الدول النامية حيث يحيا نحو ثلاثة أرباع سكان المعمورة، وفى بعض البلدان النامية تشكل الطاقة من مصادر حيوية ٩٠% من الطاقة الكلية، وتستخدم هذه الطاقة بالمثل فى بعض البلدان الصناعية كالولايات المتحدة (٤%)، والنمسا (١٠%)، والسويد (٩%).

ويكشف تحليل سيناريو الطاقة بالهند عن أن المصادر الحيوية هى واحدة من أكثر الصور المبشرة للطاقة المتجددة التى تلائم الظروف السائدة بالبلاد على الصعيدين الاجتماعى والاقتصادى، وتمثل طاقة المصادر الحيوية مصدرًا متجددًا ونظيفًا، فهى بديل مرغوب بحق، وعلى ذلك فإن المصادر الحيوية البرية (البقايا العضوية والنباتات العليا)(*)، والمصادر الحيوية المائية (نباتات المياه العذبة، والحشائش البحرية والطحالب البحرية الدقيقة، والنباتات البحرية الطافية، والكائنات التى تتحمل الملوحة العالية)، تستأثر بقدر كبير من العناية فى أى برنامج لتطوير مصادر الطاقة، وبخاصة فى بلد كالهند،وربما عاون التعويل بدرجة أكبر على الطاقة الحيوية، على المحافظة على نظافة البيئة، فالنباتات تستعمل لنموها غاز ثانى أكسيد الكربون، ومن هنا فمصادر الطاقة الحيوية مقبولة بيئيًا، ويتضمن استعمال الطاقة الحيوية للتنمية على نطاق أوسع حدًا أدنى من الإخلال بالتوازن

(*) النباتات العليا **vascular, tracheophytes or higher plants** هى طائفة النباتات التى لنسيجها تركيب خاص يسمح بتوصيل الماء والغذاء (المترجم)

البيئى ويمدنا بوسيلة لإعادة تدوير المواد الغذائية وثانى أكسيد الكربون من الجـو، وهناك أسباب إضافية تحبذ الاعتماد على المـصادر الحيويـة كمـصدر للطاقـة وبصورة خاصة فى بلد نام كالهند، تتلخص فيما يلى:

- المصادر الحيوية متاحة بصورة أكثر من الوقود الأحفورى بما لا يقاس، ويمكن بحسن القيام على إدارة عمليات تحويلهـا، أن تـصبح مـصدرا متجددا لا ينضب.
- يمكن ابتكار وسائل حديثة لاستخلاص الطاقة مـن المـصادر الحيويـة بتكاليف تنافسية.
- الطاقة من المصادر الحيوية مع تحديث أساليب اسـتغلالها تقـدم أساسًـا طيبًا للتنمية الريفية وتشغيل العمالة فى الدول النامية.
- التوسع فى استخدام الطاقة من المصادر الحيوية فى الدول الناميـة فـى الأراضى التى تدهورت درجة جودتها أو التى أزيلت منها الغابـات قـد تمثل آلية يمكن بموجبها تمويل استصلاح مثل هذه الأراضى.
- بالتوسع فى استخدام الطاقة الحيوية بطريقة متـواترة، يـؤدى إنتاجهـا واستعمالها إلى انعدام تراكم ثانى أكسيد الكربون فى الجو، فثانى أكـسيد الكربون المنبثق من الاحتراق تعادله كميـات ثـانى أكـسيد الكربـون المستخلص من الجو فى عمليات التمثيل الضوئى.

عملية التمثيل الضوئى:

فى عملية التمثيل الضوئى تمتص مادة الكلوروفيل فى بلاسـتيدات خلايـا النباتات الخضراء ضوء الشمس، فتستخدمه فى إنتاج الكربوهيـدرات مـن المـاء (يد٢أ) وثانى أكسيد الكربون (ك أ٢) المستخلص من الجو، والعملية تمثلها المعادلة.

ضوء الشمس

٦ ك أ ٢ + ٦ يد٢ أ ⟵ ك ٦ يد ١٢ أ ٦ + ٦ أ ٢

وهكذا فإن ستة جزيئات من المياه وستة جزيئات من ثانى أكسيد الكربون تتحد معا منتجة جزيئا واحدًا من الجلوكوز (المركب الكربوهيدراتى) وستة جزيئات من الأكسجين، وعلى مستوى العالم تفرز عملية التمثيل الضوئى ما يقدر بحوالى ٢٢٠ بليون طن مكافئ من المادة الحيوية فى صورة جافة سنويًا، تناظر عشرة أمثال قيمة الطاقة التى يستعملها العالم.

كفاءة عملية إنتاج المادة الحيوية:

وتعنى كفاءة تحول الطاقة الشمسية الساقطة إلى طاقة كيميائية تختزن فى كربوهيدرات النبات. ويمكننا تقدير أقصى كفاءة من الاعتبارات النظرية، فالنباتات تستخدم الضوء ذا الطول الموجى الذى يتراوح ما بين ٠,٤، ٠,٧ ميكرون (الضوء المرئى) وهو المعروف باسم الإشعاع المفعل للتمثيل الضوئى، والمركبات الضوئية النشطة بالنسبة للتمثيل الضوئى تقتنص نحو ٨٠% من هذا الإشعاع الفعال، فى حين تفقد البقية بالامتصاص والانعكاس والانتقال خلال المواد التى لا تقوم بالتمثيل الضوئى، ويلزم ثمانية فوتونات من الإشعاع الفعال – كحد أدنى – لإنتاج الجلوكوز لكل جزىء يتحول من ثانى أكسيد الكربون، والطاقة المناظرة التى تختزن فى الجلوكوز الناتج تناظر ٢٨% من طاقة هذه الفوتونات الضوئية، ويستهلك زهاء ٤٠% من الطاقة المختزنة عن طريق التمثيل الضوئى خلال عملية تنفس النبات فى الظلام، والتى هى عكس عملية التمثيل الضوئى، والتى تلزم كى يقوم النبات بعملياته الحيوية من بناء وهدم داخل خلاياه، وبأخذ كل هذه الاعتبارات فى الحسبان يمكننا حساب أقصى كفاءة لعملية التمثيل الضوئى على النحو التالى:

١٠٠ × ٠,٥٠ × ٠,٨٠ × ٠,٢٨ × ٠,٦٠ = ٦,٧%

وتنطبق هذه القيمة القصوى للكفاءة على النباتات رباعية الكربون **c_4 plants** (وأول نواتج التمثيل الضوئى فيها هو سكر رباعى الكربون) مثل الأذرة، والسرغوم(*) وقصب السكر، أما بالنسبة للقمح والأرز وفول الصويا والأشجار وسواها من النباتات ثلاثية الكربون (وأول نواتج التمثيل الضوئى فيها هو سكر ثلاثى الكربون) فتمثل ٩٥% من مصادر النبات الحيوية على مستوى العالم، وأقصى كفاءة للتمثيل الضوئى بها أقل، وتفقد النباتات ثلاثية الكربون خلال التنفس الضوئى حوالى ٣٠% إلى ثانى أكسيد الكربون المثبت سلفاً، وهذه النباتات غير قادرة على استغلال ٣٠% من الضوء الذى تمتصه المركبات النشطة من ناحية التمثيل الضوئى، لأن النباتات ثلاثية الكربون تتشبع بالضوء عند مستوى شدة ضوء أقل من حالة النباتات رباعية الكربون، ومن ثم فإن أقصى كفاءة لتحويل الطاقة بالنسبة للنباتات ثلاثية الكربون هى ٠,٧ × ٠,٧ × ٦,٧ = ٣,٣%

وتؤثر درجة الحرارة بالمثل فى عملية التمثيل الضوئى، والنباتات ثلاثية الكربون تصل لأقصى معدل لهذه العملية حين تتراوح درجة الحرارة بين ٢٠، ٣٠ درجة مئوية، ولجذور هذه النباتات القدرة على الوصول إلى ما يكفى من ماء العناصر الغذائية، ولكن التمثيل الضوئى يتوقف بها عندما تهبط درجة الحرارة إلى ما بين ٠، ٥ ْم.

وعلى النقيض من ذلك تبلغ النباتات الاستوائية – بما فيها النباتات رباعية الكربون – أقصى المعدلات عندما تقع درجة الحرارة ما بين ٣٠، ٤٠ ْم، ويتوقف التمثيل الضوئى بها ما بين ١٠، ١٥ ْم.

(*) السرغوم أو الدخن الهندى **sorghum** نبات ذو أنواع متعددة شبيه بالأذرة، يزرع كعلف أو لإعداد شراب كثيف القوام حلو المذاق (المترجم)

توابع ارتفاع مستوى ثانى أكسيد الكربون وتأثيره على إنتاج المصادر الحيوية:

تشمل تداعيات ارتفاع نسبة ثانى أكسيد الكربون على إنتاج المصادر الحيوية ما يلى:

١) من شأن تركز ثانى أكسيد الكربون بالنسبة لأكسجين التنفس الضوئى **photorespiration** أن يقلل من عملية التنفس الضوئى لصالح عملية التمثيل الضوئى.

٢ – تحتفظ النباتات بالنسبة الأكبر من الكربون فى أجزائها تحت سطح الأرض أكثر من نسبته فى أجزائها فوق سطحها، وهذا التوزيع قد يعادل – جزئيًا – الفوائد التى نحصل عليها من محاصيل الطاقة من مصادر حيوية والمتمثلة فى التمثيل الأسرع لثانى أكسيد الكربون.

٣) كفاءة استعمال الماء، سواء فى النباتات ثلاثية أو رباعية الكربون ستزداد بارتفاع نسب ثانى أكسيد الكربون (تتناسب الاحتياجات من المياه عكسيا مع كفاءة استعمال الماء والمقيسة بملليجرامات ك أ ٢ المثبتة فى التمثيل الضوئى لكل جرام من ماء النتح **transpiration**(*)، فلو افترضنا أن ثانى أكسيد الكربون فى الجو قد تضاعف، فسينخفض نتح الماء بمقدار ٣٠ أو ٤٠% لكل وحدة مساحات من سطح أوراق النبات بنوعيه، فى حين سيرتفع معدل التمثيل الضوئى بنسبة ٣٠% للنباتات ثلاثية الكربون، وبنسبة لا تذكر بالنسبة للنباتات رباعية الكربون، فإذا أخذنا فى الحسبان كلا العاملين، فينبغى أن ترتفع كفاءة

(*) يقصد بعملية النتح **transpiration** رشح الماء خلال أنسجة أوراق النبات (المترجم)

استعمال الماء بنسبة ٧٥% للنباتات ثلاثية الكربـــون، ٣٥ % للنباتـــات رباعية الكربون.

٤) الكثير من النباتات ثلاثية الكربون التى تنمو فى ظل ظروف نقص فـــى المواد المغذية لها تبدى ميلا للنمو الأسرع إذا ما زاد تركيز ثانى أكسيد الكربون.

وينبغى أن يؤخذ فى الاعتبار أيضًا تأثيرات التغير فى درجة الحرارة ونسبة الرطوبة، والذى يجلبه ارتفاع ثانى أكسيد الكربون المنبعث، علـــى إنتـــاج المـــادة الحيوية، ولسوء الحظ لا يعرف اتجاه هذه التأثيرات. وكمحصلة، تـــشير الـــدلالات إلى أن رفع نسب ثانى أكسيد الكربون قد يدعم نمو المادة الحيويـــة بمـــا يزكـــى استخدامها كمصدر للطاقة.

تطوير مصادر المادة الحيوية:

استزراع المواد الحيوية بهدف الحصول على طاقة: يمكـــن تـــوفير المـــادة الحيوية – كمادة خام للحصول على الطاقة إما بتكثيـــف زراعـــات الأشـــجار ذات الدورة القصيرة، أو باستزراع النباتات العشبية، والنباتات العشبية إمـــا أن تكـــون حشائش ذات سيقان غليظة مثل السرغوم وقصب السكر أو ذات سيقان رفيعة مثل الدخن العصوى(*).

وينبغى العناية بمحاصيل المادة الحيوية المزروعة بهدف الحـــصول علـــى الطاقة كالعناية بالمحاصيل الزراعية، ويمكن أن تحصد محاصيل الزراعـــات ذات الدورة القصيرة كل ٣ – ٨ سنوات مع إعادة الاســـتزراع كـــل ١٥ – ٣٠ ســـنة،

(*) الدخن العصوى **switchgrass** نبات عشبى معمر ينتمى لجنس الدخن من الفصيلة النجيليـــة وموطنـــه الأصلى أمريكا الشمالية وهو أحد محاصيل الطاقة الواعدة (المترجم)

وبالنسبة للحشائش المعمرة على مدار العام من شأن الحصاد أن يتم كل ٦ – ١٢ شهرًا، فى حين يعاد الاستزراع مرة فى كل عقد.

ويوجد حاليًا نحو ١٠٠ مليون هكتار(*) من الأراضى على مستوى العالم مزروعة بالأشجار خصيصًا للأغراض الصناعية، هى فى الأغلب أشجار بطيئة النمو توجه لأسواق منتجات الغابات التقليدية، وهناك أراض تقدر مساحتها بحوالى ٦ مليون هكتار متاحة لاستزراع الأشجار الصنوبرية ذات الخشب الصلد، وهو أنسب الأنواع فى الأسواق للحصول على الطاقة.

وبناء على تقرير من اللجنة الوطنية لدراسة أخشاب الوقود أعد عام ١٩٨٢، فقد حسبت احتياجات الهند الإجمالية من أخشاب الوقود، وقدرت بزهاء ١٣٣ مليون طن، فى حين أن المتاح سنويًا هو ٤٩ مليون طن، ومن ثم فقد بينت الدراسة أن هناك فجوة هائلة ما بين الطلب والمعروض من خشب الوقود، وهى الفجوة التى تتزايد يوما بعد يوم، ولسد هذه الفجوة أشارت هيئة الزراعة الوطنية بضرورة تخصيص مساحة سنوية مقدارها ٢٠ مليون هكتار لهذا الغرض.

وإلى جانب القطاع الريفى، هناك استهلاك لا يستهان به من خشب الوقود فى المدن الحضرية الرئيسية بالهند، وقد أنشأت إدارة مصادر الطاقة غير التقليدية سلسلة من المراكز البحثية فى البلاد للبحث عن مصادر الطاقة الحيوية وأنجزت بالفعل عدة دراسات فى تلك المراكز، وأهمها مركز **NBRI** بلوكناو، وجامعة مادوراى كامراج بمادوراى، وجامعة جارهوال، وجامعة راجستهان الزراعية، وتتضمن الدراسات التى تجرى بهذه المراكز اختيار نوعيات النباتات سريعة النمو ذات الدورات الطويلة، وإقامة المزارع التجريبية لتقييم المردود المتوقع تحت ظروف زراعة أشجار الغابات المختلفة، بما فى ذلك تقييم الزراعة اقتصاديًا،

(*) الهكتار: وحدة مساحة تعادل ٢,٣٨ فدان (١٠٠٠٠ متر مربع) (المترجم)

ومكافحة الآفات وتصميم شبكات الرى، وتنويعات التركيب المحصولى، وزراعة أكثر من محصول فى الأرض نفسها (فى صفوف متبادلة).

وهناك عدد كبير من نوعيات النباتات سريعة النمو تم التعرف عليها مما يمكن استزراعه فى الأراضى القاحلة، إلا أنه لم يتم بالفعل إلا استزراع القليل منها مثل الأوكاليبتوس(*) واللوكاينا(**) والأكاسيا والجازورينا.

وفى سبيل انتقاء أفضل النوعيات المبشرة كخشب وقود تحت الظروف الجوية والزراعية المتباينة، بدأت إدارة مصادر الطاقة غير التقليدية بالفعل برنامجًا مكثفًا لأعمال الدراسة والتطوير مع التركيز على المحاور الثلاثة التالية:

١) توصيف تفصيلى لخواص التربة.

٢) إجراء القياسات لمعدلات نمو النباتات.

٣) تقييم كميات الطاقة المتحصل عليها من التجارب على النوعيات المختلفة.

تحويل الطاقة من مصادر الطاقة الحيوية:

بقدر تنوع مصادر الطاقة الحيوية، بقدر ما تتنوع تكنولوجيات تحويلها، وقد استخدم لمدة طويلة الحرق المباشر للمواد الحيوية وتحويلها إلى غاز، ولم تطور

(*) الأوكالبتوس **Eucalyptus**: شجر ذو أوراق عطرية يستخرج منه زيت يستخدم لأغراض طبية ويستخدم خشبه فى الصناعة (المترجم)

(**) اللوكاينا **Leucaena**: طائفة نباتات ذات زهر أبيض ينتشر وجودها فى جنوب الولايات المتحدة وبيرو (المترجم)

التكنولوجيات الأخرى كالتخمر والتحلل بالحرارة لأغراض استخلاص الطاقة، ولكنها حورت لإنتاج أنواع الوقود السائل لكى يحل محل الوقود الأحفورى الأولى، وبصفة عامة يمكن تصنيف استخدامات الطاقة من المصادر الحيوية إلى:

١) الاحتراق المباشر (لأغراض الطهى والتسخين وتشغيل المراجل باستخدام الخشب إما بصورته الأولية أو كخشب جاف **torrefied** أو باستخدام الفحم النباتى.

٢) التحويل إلى غاز بقدرة منقولة عبر عمود **shaft power** أو بتسليط حرارة.

٣) التوليد المشترك (غازات من التحلل بالحرارة تستخدم كمصدر حرارى فى عمليات التصنيع الزراعى والفحم النباتى كمنتج ثانوى أو العكس بالعكس).

وفى كل البلاد تقريبًا التى يلعب فيها الوقود الحيوى دورًا ذا أهمية نسبية، يسود الطلب على وقود الخشب للأغراض المنزلية، وفى هذه الاستخدامات المنزلية ما يزال الفحم هو الوقود المفضل والرئيسى بفضل خواصه المعروفة جيدًا.

ويستخدم التحلل اللاهوائى للمواد العضوية الحيوية لإنتاج الغاز الحيوى الآن فى إطار برنامج وطنى قومى بالهند أخذًا فى الحسبان تطبيق تقنيات تحويل المواد الحيوية الحديثة والإفادة منها على مجال واسع، وسنصف فيما يلى بعض برامج تحويل المادة الحيوية بالهند.

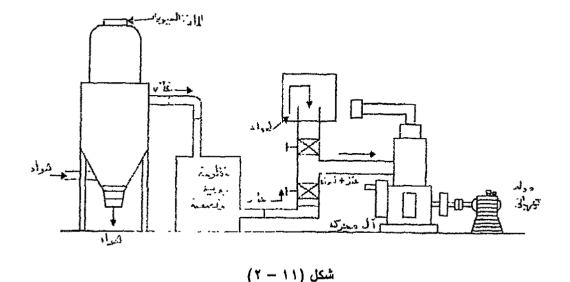
التحويل للحصول على طاقة:

تمثل كهربة الريف أحد الدعامات الأساسية فى البنية التحتية لتنمية المناطق الريفية، وفى برامج التنمية الريفية يجرى التركيز على كهربة القرى واستعمال الكهرباء فى تشغيل المضخات، ويتم التركيز فى الوقت الراهن على الإسراع فى برنامج تطوير لنوعية الأحمال، وبصفة خاصة كهربة الأجهزة المنزلية، وبالنظر

إلى تكلفة تشغيلها الزهيدة وعدم تخلف آثار بيئية سلبية عنهـا ومـا تحققـه مـن اللامركزية المطلوبة فى إنتاج الطاقة، فإن المصادر الجديدة والمتجددة تقـدم آفاقـًا رحبة فى مجال كهربة المناطق الريفية، وفى المقدور استعمال الكهرباء المنتجة من هذه المصادر بحيث تلبى الاحتياجـات الأساسـية، كالإنـارة والـشرب والـرى والصناعات الزراعية، ومن الممكن أن يسهم توليد القدرة من النباتات المـستزرعة لذلك إسهامًا فعالاً فى بانوراما الطاقة بالريف، فهى بديل واعد لتلبية قسم كبير من الطلب على الطاقة.

تحويل المادة الحيوية إلى غاز:

يساعد تحويل المادة الحيوية على الحفاظ على زيت البتـرول، ومـن بـين التقنيات المتنوعة، تنفرد هذه التقنية بتقديم آفاق واعدة، ويمكـن الاعتمـاد عليهـا لسهولتها فى تشغيل مضخات الرى وحتى الصغيرة منها ذات القدرة ما بين ٥، ١٠ حصان، وتتلاءم تقنية تحويل المادة الحيوية لغاز مع المناطق النائية التـى يتعـذر تزويدها بالقدرة المحركة عبر خطوط النقل المعتادة، ففى مثل هذه المناطق تتـيح تقنية تحويل المادة الحيوية لغاز مصدرًا رخيصًا للطاقة (شكل ١١ – ٢).



شكل (١١ – ٢)

رسم تخطيطى لعملية تحويل المادة الحيوية إلى غاز

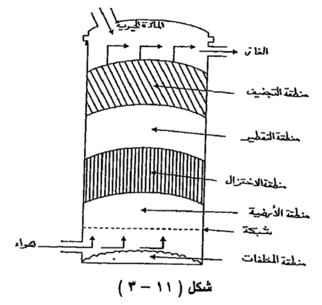
أنواع المحولات لغاز:

هناك أربعة أنواع من محولات المادة الحيوية لغاز:

- محول للغاز ذو أرضية ثابتة وتيار صاعد.
- محول للغاز ذو أرضية ثابتة وتيار هابط.
- محول للغاز ذو تيار عرضى (جانبى).
- محول للغاز ذو أرضية عائمة (متحركة).

والمحول للغاز ذو الأرضية الثابتة والتيار الصاعد هو أقدم هذه الأنواع (شكل رقم ١١ – ٣) وفيه يدخل الهواء اللازم للعملية إلى الغرفة تحت مستوى الأرضية، فتتكون منطقة احتراق لدى درجة ٢٥٠٠° فهرنهيت(*) تقريبًا.

وتتحرك غازات الاحتراق متجهة إلى أعلى مارة بالأرضية، وتخرج لدى القمة بعد أن تكون قد بردت إلى درجة ٢٠٠ على مقياس فهرنهايت تقريبًا (٩٣ م°).



شكل (١١ – ٣)

المحول الغازى ذو التيار الهابط أو التيار الموازى

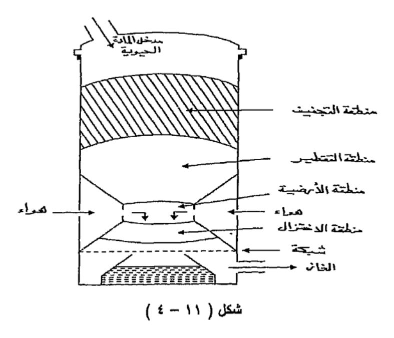
(*) تعادل حوالى ١٣٧٠ درجة مئوية (المترجم)

ويتمتع هذا التصميم بالمزايا الآتية:

- صلاحيته للعديد من أنواع وقود المادة الحيوية.
- إمكانية استخدامه فى تحويل الوقود الرطب، وعدم ضرورة الالتزام بحجم معين.
- تحلل كمية أقل من المياه، وكفاءة أعلى.

ويعيب هذا التصميم انخفاض درجة حرارة خروج الغاز، مما يصعب من نقله، لأن القطران وغيره من السوائل يسهل تكاثفها، ومن ثم فهذا النوع غير صالح لإدارة الآلات.

ويشبه المحول لغاز ذو الأرضية الثابتة والتيار الهابط، المحول ذا التيار الصاعد، فيما عدا أن الهواء يدخله عند منطقة الاحتراق أو أعلاها، ويخرج بالقرب من قاع الغرفة.



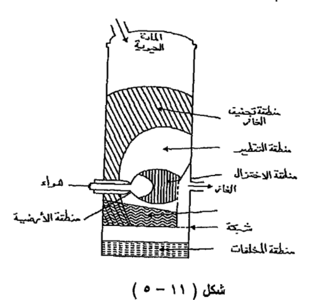
شكل (١١ – ٤)

المحول الغازى ذو التيار الصاعد أو التيار العكسى .

والمحول الغازى من نوع التيار الهابط به سريان متـواز، حيـث ينـساب الوقود إلى أسفل تحت تأثير وزنه.

ويدخل الوقود قرب قمة المحول فى حين يغادره الغاز عنـد قاعـه، وتقـع منطقة الاختزال عند قاع طبقة الوقود، وتعلوها منطقة التأكسد، ومن ثـم فمنطقـة الاختزال على مقربة من منطقة الرماد، وحيث إن الغاز يسرى إلـى أسـفل فـإن المواد سهلة التطاير تمر عبر منطقة التأكسد ذات درجة الحرارة المرتفعة حيـث تتكسر المركبات الهيدروكربونية العليا والبوليمرات العليا وتتحلل إلـى مركبـات أبسط وهيدروكربونات غير قابلة للتكثف، مثل الميثان (ك يد٤) والـ (ك ٢ يـد ٢) وما إلى ذلك، ومن ثم فالغاز المنتج نظيف وخال من القطران.

ويبين شكل (١١ – ٥) محولا للغاز ذا سريان عرضـى (جـانبى)، وهـو محول مدموج صغير الحجم يناسب كثيرًا إنتاج الكميات المحـدودة مـن القـوى المحركة، كما أن هذا النوع يلائم الأحمال المتغيرة، وإن كان يعيبه اقتصاره علـى استعمال الفحم النباتى وعدم قدرته على تحويل الوقود الرطب إلى غاز.

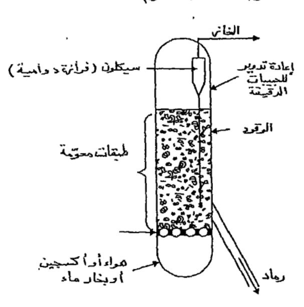


شكل (١١ – ٥)

محول للغاز ذو سريان عرضى (جانبى)

أما المحول للغاز ذو الأرضية العائمة (شكل ١١ – ٦) فقد تطور تـصميمه بحيث يبشر بالوصول إلى سعات أكبر ومعدلات إنتاج أعلى مـن المحـولات ذات الأرضية الثابتة، وبفضل درجة حرارة الغازات الخارجة العالية، فيمكن نقلها عبـر مسافات أطول من تلك التي ينتقل لها الغاز المنـتج فـى المحـولات الأخـرى، وللمحولات ذات الأرضية العائمة ميزة المرونة فى المادة الخام المستعملة من حيث حجمها ومحتواها من الرطوبة، وذلك لخلو المحول من أرضـية مثبتـة، ولهـذه المحولات الغازية أعلى معدل للتحويل لغاز لكل متر مربع من مساحة الأرضـية، كما أنها نموذجية للاستعمال مع حبيبات الوقود الضئيلة، وتـتلخص عيـوب هـذا النظام فى ارتفاع كمية المواد المنبعثة فى هيئة حبيبات، إلى جانب الحاجـة إلـى مصدر حرارى مساعد لتسخين الأرضية تسخينًا مبدئيًا فى البداية.

وتصل كفاءة عملية التحويل فى المحولات ذات الأرضية المتحركـة لقـيم عالية (٨٠% فى حالة تحويل الخشب لغاز).



شكل (١١ – ٦)

محول للغاز ذو أرضية عائمة

التطورات المتقدمة فى تكنولوجيا الغاز الحيوى كمصدر للطاقة:

يعد الغاز الحيوى مصدرًا له أهميته بين مصادر الطاقة المتجددة التى يتم الحصول عليها من المواد العضوية، كروث الماشية والمخلفات البشرية، ومختلف أنواع الكيانات الحيوية، وهو وقود عديم الدخان صالح للاستخدام المنزلى.

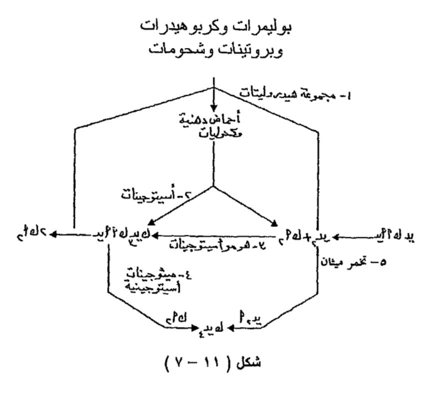
وتنتج محطة القوى التى تعمل بالغاز الحيوى بالمثل أنواعًا من السماد الغنى عالى الجودة، ويستتبع تطبيقها العديد من المنافع الاجتماعية، كالتقليل من تقطيع الأشجار لاستخدامها كأخشاب للوقود، والاستغناء عن المهام الشاقة التى تنوء بها النسوة والأطفال، وتحسين الظروف الصحية والبيئية، والتقليل من معدلات أمراض العين والرئة، وتوفير أوقات أطول للعمالة الإنتاجية، لقد بدأ استخدام الغاز الحيوى فى إحداث ثورة فى أساليب الحياة فى كثير من المناطق الريفية بالهند، ولقد حظى برنامج استعمال الغاز الحيوى بشعبية متزايدة فى القرى امتدت به إلى كل أنحاء البلاد تقريبًا.

تخمر الميثان:

تهدف تقنية استخدام الغاز الحيوى إلى مضاعفة تلك الظاهرة الطبيعية التى تنتج غاز الميثان بمعزل عن الهواء من تحلل المواد العضوية ذات القابلية للتحلل، ولقد استخدمت المصطلحات من قبيل "غاز المستنقعات"، و"الوهج المستنقعى"(*)، و"الهواء القابل للاشتعال" فى القرنين السادس عشر والسابع عشر لوصف الغاز الحيوى الذى ينتج بفعل الكيانات الميكروبية، ولقد درس هذا التفاعل بصورة

(*) الوهج المستنقعى wisp ضوء ذو وميض يبرق بسرعة فوق المستنقعات السبخية فى الليل على الأرجح نتيجة الاحتراق التلقائى والطبيعى للغازات الناتجة عن تحلل المواد العضوية المتعفنة (المترجم)

تفـــصيلية خـــلال العقــود الأخيــرة، ويطلـــق عليـــه عمليـــة تخمـــر الميثـــان **methanogenous**، أو التحلل اللاهوائى للمواد العضوية وتقوم به أربع طوائف من البكتريا هى اسميا: بكتريا التحلل بالميـــاه **hydrolytic** وبكتريـــا حمـــض الخليـــك **acetogens** وبكتريا أكسدة الهيدروجين الحمضية المثلية وبكتريـــا تخمـــر الميثـــان (شكل ١١ – ٧).



شكل (١١ – ٧)

سلسلة تفاعلات التخمر الميثانى

وتتحلل البوليمرات – مثل السليلوز – بفعل المياه – إلى أحمـــاض دهنيـــة وإلى كحوليات، تتحلل بدورها إلى أسيتات(*) وفورمات وهيدروجين وثانى أكـــسيد الكربون وغيرها، وفى المراحل الختامية تقوم الكائنات الحيوية الأكثر قدرة علـــى البقاء على قيد الحياة والتى تنتج الميثان، بتحويل مركبـــات تحتـــوى علـــى ذرة أو

(*) الأسيتات هى أملاح حمض الخليك (المترجم)

ذرتين من الكربون إلى غاز الميثان، وبالنظر إلى أنه أخف من الهواء يبدأ الميثـان في التصاعد من المواد المتخمرة، ومن هنا فإن محطات القوى المعتمدة على الغاز الحيوى تتجه فى تصميمها صوب خلق أفضل الظروف لتتم التفاعلات التى تقـوم بها مختلف فصائل هذه الكيانات الحيوية.

الإمكانات المستقبلية:

تمتلك الهند أكبر عدد من الماشية على مستوى العالم (٢٤٠ مليـون رأس) وهو ما يمثل إمكانيات هائلة لتطوير إنتاج الغاز الحيوى، وهناك زهاء ٧٥ مليـون عائلة زراعية، تقتنى ٤٣% منها ٤ رءوس ماشية أو أكثر (وهو ما يمثـل الحـد الأدنى من عدد الماشية الضرورى لإقامة محطة صغيرة بالغاز الحيوى) وقد أكد مجلس التوصيات الخاصة بالطاقة فى تقريره المعنون "نحو منظور جديـد للطلـب والاستهلاك من الطاقة فى الهند عام ٢٠٠٤ – ٢٠٠٥" علـى أن وحـدات الغـاز الحيوى صغيرة الحجم بوسعها أن تلبى الاحتياجات من الوقود لأغـراض الطهـى لحوالى ١٦ إلى ٢٢ مليون مسكن فى عام ٢٠٠٤ – ٢٠٠٥ م.

التطور التاريخى لاستغلال الغاز الحيوى بالهند:

بدأ تطبيق مبدأ استغلال روث الماشية فى وحدات الغاز الحيوى بالهند مـن خلال "المعهد الهندى للبحوث الزراعية" بنيودلهى عام ١٩٣٩، فقد درس الـدكتور س. ف. ديساى تأثير العوامل البيئية المختلفـة كدرجـة الحـرارة، وقيمـة الأس الهيدروجينى PH(*) وما إلى ذلك، على الإنتاج من الغاز، ووضع تصميمًا مبـسطًا لمصنع غاز حيوى، وقد تابع البروفسور ن. ف. جوشى فى بوتا هـذه الأعمـال، فاعتمد نموذجًا لمصنع غاز حيوى عام ١٩٤٥، كما ابتكـر جاشـبهاى ج. باتـل

(*) قيمة الأس الهيدروجينى Ph value هى مقياس لدرجة الحامضية، ويبدأ من الصفر (أقصى حامـضية) وحتى رقم ١٤ والرقم ٧ يناظر حالة التعادل كالماء النقى (المترجم)

نموذجًا مبسطًا بمسمى جراملا كسمى **Gramlaxmi** واعتمده سنة ١٩٥١، وقد تبع ذلك أعمال فى راماكريشنا ميشان أشرام فى بيلورمات بكلكتا وخادى براتيشان، وسيدور.

ولقد أجرى الدكتور س. ن. أشاريا ومساعدوه تجارب مكثفة فى المعهد الهندى للبحوث الزراعية بنيودلهى، وابتكروا النموذج المسمى بتصميم يارى **IARI** وأصدر المجلس الهندى للبحوث الزراعية فى ١٩٥٨ نشرة علمية بعنوان "إعداد غاز الوقود والروث عن طريق التخمر اللاهوائى للمواد العضوية".

وقد استأنف ج. ج. باتل مجهوداته فى سبيل تبسيط نموذجه الذى سبق اعتماده، وأفضى ذلك إلى استحداث نموذج ذى غرفتين ودليل موجه مركزى يتيح لحاوى الغاز الصلب حرية الحركة لأعلى وأسفل، وسمى هذا النموذج "جراملاكسمى ٣" وقد قامت مفوضية الخادى والصناعات القروية ببومباى باتباع هذا النموذج لتعميمه عام ١٩٦٢ وهو شائع الآن ومعروف باسم تصميم "حاوى الغاز الهندى من النوع العائم" **(KVIC)**(*)، ومن خلال جهود المفوضية ما بين أعوام ١٩٦٢، ١٩٧٣ – ١٩٨٤، أقيمت حوالى ٧٠٠٠ وحدة تعمل بالغاز الحيوى بالبلاد، وقد صمدت تلك الوحدات للزمن بفضل بساطتها وسهولة صيانتها ومتانتها، ولقد اتبع نفس النموذج فى عدد من بلدان آسيا وإفريقيا.

ولقد شغف قسم "التخطيط والبحوث والتنفيذ" التابع لمعهد التخطيط القومى – حكومة أو براديش – لوكناو بأعمال الغاز الحيوى عام ١٩٥٧، فأقام محطة للبحوث أطلق عليها بحوث غاز جوبار(**) **Gobar** فى عام ١٩٦٠ بقرية "أجيتمال" بمقاطعة "إيتاواه" وقد طور "رام بوكس سينج" وهو الذى سلخ أكثر من عشرين

(*) **KVIC**: هى الحروف الأولى من عبارة مفوضية الخادى والصناعات الريفية، والخادى هو اسم قماش يغزل يدويًا وهو الذى اتخذه المهاتماغاندى رمزًا لسلاح مواجهة الاستعمار سلميا (المترجم)

(**) جوبار **Gobar**: كلمة هندية تعنى روث الأبقار (المترجم)

عامًا فى الأعمال المتعلقة بالغاز الحيوى بأجيتمال – تصاميم متنوعة لمحطات كبيرة الحجم ذات مرحلتين لتحلل المواد العضوية ومساحات أكثر برودة، ومحطات لتسخين الماء شمسيًا وغير ذلك، كما طور أيضًا من مشاعل الاحتراق، وعدل من تصميم آلة الاحتراق الداخلى بالبترول كى تعمل بالغاز الحيوى، وخلال الفترة ١٩٧٦ – ٧٨، أجريت محاولات ميدانية على نطاق واسع على محطات القوى العاملة بالغاز الحيوى ذات القبة الثابتة **fixed dome** فى إيتاواه من حيث أشكالها وأبعادها، وقد تمخض هذا عن تطوير نموذج القبة الثابتة القائم على استخدام روث الماشية، وهو النموذج الشائع المسمى "بنموذج جاناتا" والذى تواصل تحسنه باطراد منذ ١٩٧٩.

وقد اتخذت الخطوة التالية فى التوسع فى التقنية فى أعقاب أزمة الطاقة، حيث دشنت وزارة الزراعة (الهندية) برنامجًا لتطوير "مصادر السماد المحلية"، والذى كان الغاز الحيوى أحد أركانه، وفى الفترة من ١٩٧٤ – ١٩٧٥ إلى ١٩٧٨ – ١٩٧٩، استكملت فوق ٧٠٠٠٠ وحدة غاز حيوى، وقد استأنفت مفوضية الصناعات القروية وحكومة الولاية البرنامج فى عامى ١٩٧٩ – ٨٠، ١٩٨٠ – ١٩٨١ حيث استكملت ٣٠٠٠٠ وحدة أخرى.

وقد أفادت الفترة البينية (١٩٧٩ – ٨٠، ١٩٨٠ – ٨١) قبل أن تستعيد حكومة الهند زمام المبادرة فى تقييم الخبرة السابقة وإطلاق استراتيجيات مستقبلية، فقد تقرر – فى ضوء الإمكانيات المتاحة بالبلاد، والحاجة الملحة لإيجاد بديل من مصادر وقود متجددة بالمناطق الريفية، رفع وتيرة تطوير برنامج الغاز الحيوى إلى الضعف، فوضعت صياغة "لمشروع قومى لتطوير استغلال الغاز الحيوى" **(NPBD)** على أساس نماذج تصميم ووكالات تصنيعية متعددة، من منظور اللامركزية، وللمرة الأولى ينطلق برنامج متكامل يتيح تقنيات مبتكرة داعمة وتدريبًا وحوافز مالية ورقابة رشيدة وغير ذلك، ولقد اكتسبت تلك الخطة أهمية

إضافية عندما شملها برنامج رئيس الوزراء لعام ١٩٨٢، والذى تضمن عشرين نقطة، ولقد فعلت "إدارة مصادر الطاقة غير التقليدية عام ١٩٨٤ – ١٩٨٥ حزمة من الإجراءات التى طفرت بالتقدم فى هذا المجال طفرة ملموسة، بما حقق له انتشارًا وشعبية فى عموم البلاد.

أشهر أنواع محطات الغاز الحيوى فى الهند:

المحطات ذات الطابع العائلى:

هناك تصميمان لمحطات قوى الغاز الحيوى تم اختبارهما وأثبتا جدارتهما الميدانية، هما:

أ) محطة الغاز (جوبار **gobar**) من طراز **KVIC** ذات وعاء للغاز من النوع العائم (شكل ١١ – ٨).

ب) الطراز ذو القبة المثبتة (محطة قوى الغاز الحيوى المعروفة باسم جاناتا **Janata** (شكل ١١ – ٩).

ولقد ابتكرت خمسة طرز مستحدثة ثم اختبارها ميدانيًا وثبتت صلاحية التوسع فيها: وبيانها كالتالى:

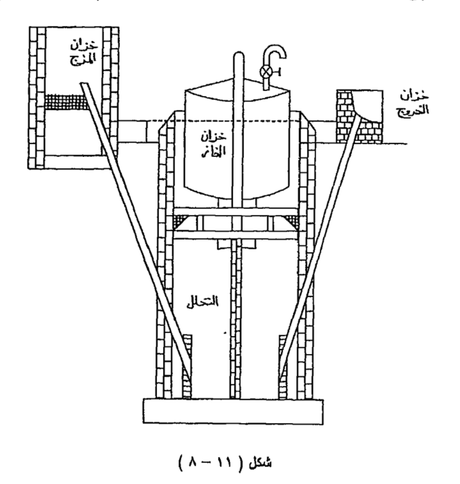
١ – محطة قوى ذات وعاء للغاز من النوع العائم وتحتوى منظومة لتحليل المواد العضوية من زوايا حديدية وصفائح من البوليثلين، ويطلق عليه نموذج (جانيش **Ganech**).

٢ – محطة قوى ذات وعاء للغاز من النوع العائم وتحتوى منظومة لتحليل المواد العضوية من أجزاء مثقبة من الأسمنت والحديد.

٣ – محطة قوى ذات وعاء للغاز من النوع العـائم مـصنع مـن المـواد البلاستيكية المقواة بالألياف الزجاجية.

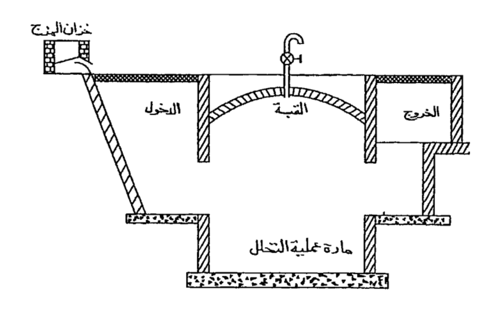
٤ – محطة قوى ذات قاعدة مخروطية الشكل ومنظومـة لتحليـل المـواد العضوية على شكل قشرة، ومزودة بوعاء للغاز، ويطلـق علـى هـذا الطراز نموذج براجاتى **Pragati**(شكل ١١ – ١٠).

٥ – نموذج ذو قبة مثبتة للتركيبات المتنوعة ومزود بمصاريع تسمح بتقسيم القبة إلى أجزاء، ويسمى طراز "دينباندهو **Deenbandhu**" (شكل ١١ – ١١).



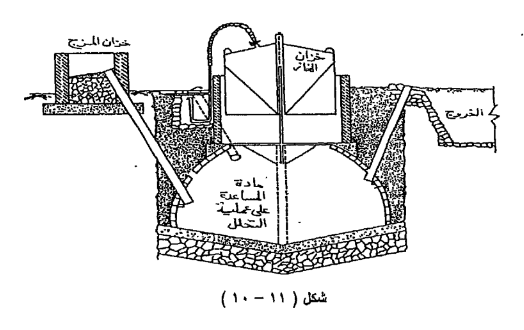
شكل (١١ – ٨)

محطة قوى ذات وعاء للغاز من النوع العائم من طراز (KVIC)



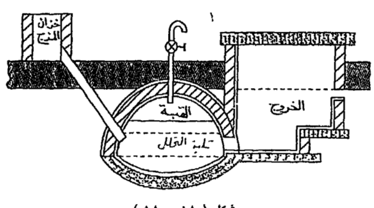
شكل (١١ – ٩)

محطة قوى بالغاز الحيوى ذات قبة مثبتة (طراز جاناتا Janata)



شكل (١١ – ١٠)

محطة قوى بالغاز الحيوى من طراز (براجاتى pragti)



شكل (١١ – ١١)

محطة قوى بالغاز الحيوى ذات قبة مثبتة من طراز (دينباندهو Deenbandhu)

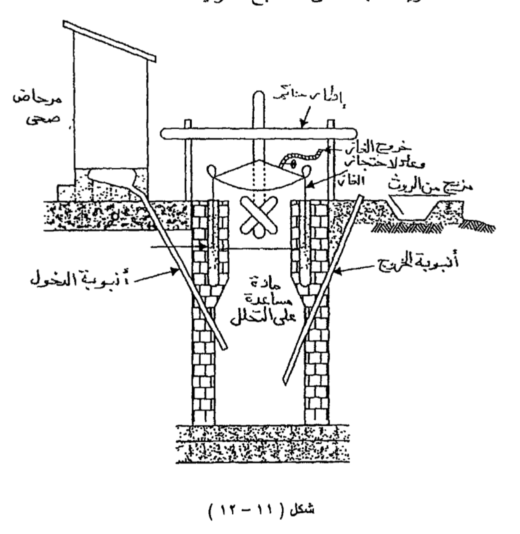
وقد وضعت أنماط قياسية لفترات الاحتباس الهيدروليكى(*) لمختلف المناطق وفقا لنطاقات درجات الحرارة وكما هو موضح بالجدول التالى:

رقم المنطقة	متوسط درجة الحرارة شتاءً (ْم)	فترة الاحتباس فى مصنع الغاز الحيوى بالأيام
١	أكثر من ٢٠	٣٠
٢	من ١٥ إلى ٢٠	٤٠
٣	من ١٠ إلى ١٥	٥٥
٤	أقل من ١٠	غير ملائمة

ومحطات القوى بالغاز الحيوى التى تحظى بشعبية فى الهند هى – فى المقام الأول من طراز التخمر العضوى شبه المستمر، وأكثر الخامات التى تستخدمها روث الماشية ويمكن بالمثل استخدام الغائط البشرى، ومخلفات الدواجن وفضلات الماشية الأخرى وما إلى ذلك فى هذه النماذج دونما مشاكل، ومن بينها تشيع محطات القوى التى تستعمل الغائط البشرى (شكل ١١ – ١٢). وقد شغل

(*) **hydraulic retention** يقصد بها هنا مدة بقاء المادة داخل المحول. (المترجم)

بعض المزارعين محطات قوى من النوع ذى القبة الثابتة بخليط من روث البهــائم والفضلات العضوية المجمعة من المطابخ المنزلية.



شكل (١١ – ١٢)

مرحاض صحى متصل بمحطة قوى بالغاز الحيوى

المشاكل والمعوقات:

تقترن برامج استخدام الغاز الحيوى بالكثير من المشاكل، فهى نشاط شــديدة اللامركزية، ينخرط فيه عدد كبير من المنظمات الحكومية وغيــر الحكوميـــة ذات

الالتزامات المتباينة، ويمكن تصنيف هذه المشكلات تحت أربع فئات، وهى – اسميا – مشكلات فنية، واقتصادية اجتماعية، وتنظيمية، وتمويلية.

ولما كانت المشاكل الفنية تتعلق بالتصميم، وأسلوب نقل التقنية والظروف المناخية والجغرافية، وما إلى ذلك، فهى تختلف من مكان لآخر، وفيما يلى قائمة ببعض هذه المشاكل:

أ) مشاكل مصدرها التعديلات فى مواصفات التصميم لتلائم الظروف المحلية.

ب) التغيرات الموسمية فى كمية الغاز المنتج لغياب التحكم فى درجة الحرارة وافتقاد العزل الحرارى السليم للمحطة.

جـ) تراكم المياه فى الأنابيب والحاجة لنزحها بصفة دورية.

د) ضعف الكفاءة فى تصميم المعدات التى تعمل بالغاز الحيوى.

هـ) عدم ملاءمة التصميم لظروف مناخية أو طبوغرافية معينة.

أما المشاكل الاقتصادية والاجتماعية التى من شأنها أن تعيق تنفيذ البرنامج فهى:

أ) نقص الوعى بالحاجة إلى محطات قوى الغاز الحيوى كوقود مازال غالبا، رغم توفره بالقرى بتكلفة معدومة تقريبًا.

ب) المغالاة فى بناء محطات ذات أحجام أكبر مما تدعو إليه الحاجة (كمظهر من مظاهر الوجاهة الاجتماعية).

جـ) الافتقار إلى الوعى بحكم انتشار الأمية.

د) الافتقار إلى مصادر التمويل أو القدرة على سحب القروض من المؤسسات التمويلية.

وقد قامت الولايات بالبلاد – فى فترة ما – بالاعتماد على نفسها فى تكـوين هيكلها التنظيمى اللازم، ونظرًا لضلوع عدد من المنظمات فى ذلك، ولكون الغـاز الحيوى نشاطًا ثانويًا بالنسبة للكثير منها، تبزغ من وقت لآخر المشاكل التالية:

أ) إقامة أبنية معيبة بواسطة بنائين غير مدربين أو مدربين تدريبًا خاطئًا.

ب) غياب المراقبة الحازمة فى أثناء البرامج التدريبية.

جـ) التأخر فى توريد المواد الخام والمكونات اللازمة لتشييد المحطة.

د) التأخر فى الحصول على الموافقات الرسمية علـى القـروض البنكيـة والتأخر فى إنفاقها فى مصارفها.

هـ) افتقاد التنسيق بين المؤسسات المختلفة.

وتقدم حكومة الهند تسهيلات مالية فى شكل دعم مركزى، ومشروعات مـن طراز تسليم المفتاح(*)، وحوافز تطويرية، وتحمل نفقات الإصلاح ونفقات الخدمات التنظيمية وتكاليف التدريب، وما إلى ذلك. ومع اطراد الإنجـازات المحققـة سـنة وراء أخرى، تضخمت الأعباء التمويلية، وعلاوة على ذلـك فمـن شـأن التقـدم المتسارع أن يعتمد على تطوير استراتيجية مستحدثة تقلص أعباء التمويل من على كاهل الحكومة.

ولا تعد المشاكل التى سلف استعراضها مستحيلة التخطى، فإن خلـق دعـم تنظيمى قويم، وتطوير نظم مناولة المواد الخام والأجهـزة التـى تعمـل بالغـاز الحيوى، وإخضاع تصنيع هذه الأجهزة لنظـام ضـبط جـودة صـارم ومحكـم، والإشراف الحازم على البرامج التدريبية، وتنظيم الخدمات التى تقدم ما بعد تـشييد

(*) Turn – key job

المحطات، والرقابة المنتظمة الدورية وتقييم الخطط، تكفل كلهـا المـساعدة علـى تجاوز هذه الصعوبات.

ولا شك أن هناك شعورًا بالحاجة إلى وتيرة أسرع فى تنفيذ الخطة فى كـلا المجالين: المحطات ذات النطاق العائلى، ومحطات قوى الغاز الحيوى على نطـاق مجتمع أو مؤسسة ما. وعلى أية حال فينبغى أن تصبح هذه الخطط قـادرة علـى الصمود بمفردها إلى أقصى حد ممكن، دونما أدنى دعم حكـومى مباشـر، ومـن المستطاع تحقيق ذلك من خلال جهود منسقة ومتناغمة فيما يتعلـق بالابتكـارات التكنولوجية، والاستراتيجيات الإدارية والتمويلية المستحدثة لتنفيذ البرامج على نحو لا مركزى، مع التركيز على جودة البناء وخدمات الصيانة للمحطات بعد إنشائها.

الباب الثانى عشر

تحويل طاقة المحيط الحرارية

مقدمـــة:

هناك فرق كبير فى درجات الحرارة بين المياه السطحية وتلك التى فى الأعمـــاق، فى المحيطات الاستوائية وشبه الاستوائية. ووفقا لقوانين الديناميكا الحراريـــة الأساســـية، فبمقدورنا استغلال منـــحدر درجات الحـــرارة هذا كمصـــدر للطاقـــة. ويقـــوم مفهـــوم تحويل طـــاقة المحـــيط الحراريـــة **Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)** على استغلال هذا الفارق فى درجـــات الحـــرارة لإدارة محطـــات القـــوى وإنتـــاج الكهرباء. ويعد تحويل طاقة المحيط الحرارية مصدرا غير مباشر لتكنيك اســـتغلال طاقة الشمس، فالشمس هى التى تدفئ سطح مياه المحيط. وباستطاعة محطة تحويل طاقة المحيطات ذات الكفاءة أن تولد الكهرباء بصورة مستمرة، لأن هذا الفرق فى درجات الحرارة يدوم لمدة ٢٤ ساعة يوميا.

تمتص محيطات الأرض الإشعاع الشمسى، وتختزن معظمه فـــى صـــورة طاقة حرارية بسطح مياه المحيط الدافئة. وتمتص مياه البحار نحـــو $\frac{١}{٤}$ الطاقـــة الشمسية التى تصل إلى جو الأرض والبالغة ١,٧ × ١٠ ^١٧^ وات. وفى المنـــاطق الاستوائية يمكن أن تدفئ حرارة الشمس سطح المياه إلى درجة حرارة ٢٥ ° م، فى حين تكون درجة الحرارة فى أعماقها ٥ ° م (على عمق ١٠٠٠ متـــر). وتعمـــل دورة القدرة – عند مثل هذا الفرق الطفيف فى درجات الحرارة – بكفاءة منخفضة، ومن ثم فإن محطات تحويل طاقة المحيطات باهظة التكاليف وتكون فقط ذات فائدة عملية عند وصول فرق درجات الحرارة إلى ٢٠ ° م.

ويقدر فرق الجهد الطبيعى فى القدرة نتيجة لمنحدر الطاقة هذا بنحو $١٠^{١٣}$ وات. وليس من المجدى فنيا استخلاص كل هذه الطاقة بالكامل، والتقدير العادل له يصل إلى $١٠^{١١}$ وات، وذلك مقابل طاقة توليد كهرباء مركبة يصل إجمالها على مستوى العالم إلى $١٠^{١٢}$ وات.

التقنية:

تبلغ كفاءة محطات تحويل طاقة المحيطات الحرارية ٢,٥ % تقريبا، ولانخفاض كفاءتها فإنها فى حاجة إلى معدلات سريان هائلة من مياه السطح الدافئة ومياه الأعماق الباردة. ولكى تولد مثل هذه المحطة زهاء ١٠٠ ميجاوات من الكهرباء لابد من ضخ نحو ٤٥٠ م^{٣} من كل من الماء الدافئ والبارد خلال مبادلاتها الحرارية فى كل ثانية. ويمكن تشييد محطات استغلال حرارة المحيطات على اليابسة، أو على رصيف عائم أو على سفينة بالبحر (شكل ١٢- ١). وتمثل الماسورة الضخمة اللازمة لجلب المياه الباردة إلى السطح مكونا جوهريا فى محطة استغلال حرارة المحيطات. ويتوقع أن يصل قطر هذه الماسورة إلى ٢٠مترا، وطولها لما بين ٦٠٠، ١٠٠٠ متر لبناء محطة لاستغلال حرارة المحيط بقدرة ١٠٠ ميجاوات. ويمثل إحكام تثبيت المحطة على عمق ١٠٠٠ متر تحت الماء مشاكل إضافية ولكنه جد ضرورى إذا أريد نقل الكهرباء المولده إلى اليابسة.

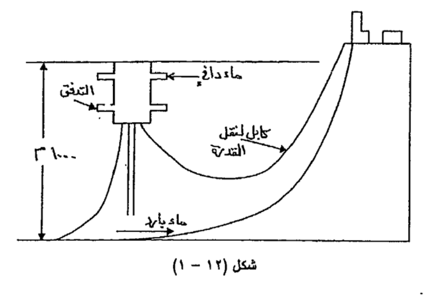
ولتحويل المنحدر الحرارى إلى طاقة كهربائية، يمكن استعمال مياه البحر الدافئة فى تسخين سائل ما ذى درجة تبخر منخفضة (يسمى بالمائع العامل) مثل الأمونيا أو الفريون أو البروبان.

وتصمم محطات استغلال حرارة المحيط للعمل على أساس الدورة المغلقة أو الدورة المفتوحة (انظر شكلى ١٢-٢، ٣).

ففى الدورة المغلقة يضخ ماء سطح البحر الدافئ عبر مبخر، يجرى فيه تبخير المائع العامل كالأمونيا، والمائع العامل فى الدورة المغلقة هو وسيط مبرد قادر على التبخر عند تعرضه للماء الدافئ، وقادر على التكثف عند تعرضه للماء البارد. ويولد المائع العامل لدى تبخره ضغطا فيتمدد، ناقلا جزءا من طاقته لتوربين، ثم يتكثف بفعل الماء البارد القادم من الأعماق وتتكرر الدورة.

ويمكن أن يستخدم ماء البحر كمائع عامل فى حالة محطات استغلال حرارة المحيطات ذات الدورة المفتوحة. وفى هذه الحالة لا يعاد تدوير المائع العامل، بـل يتبخر ماء البحر الدافئ عند ضغط منخفض للغاية (٠,٠٣ من الضغط الجوى) فى مبخر ومضى خاص flash evaporator(*)، ويمر البخار الناتج خـلال تـوربين، فيتكثف إما بفعل التلامس المباشر مع ماء البحر البارد وإما بفعل مكثف مـسطح. وفى حالة استخدام المكثف المسطح نحصل على ماء نقى عذب.

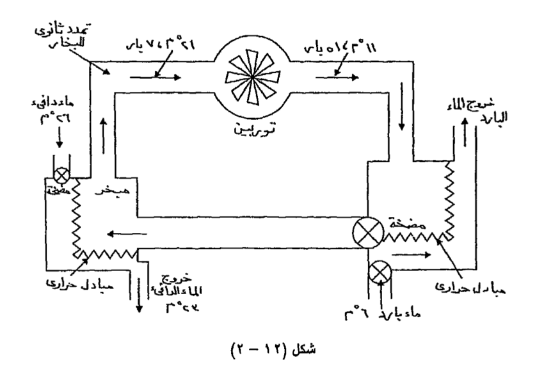
وفى كلا الدورتين المفتوحة والمغلقة يتسبب تكاثف البخار فى تولد فرق فى الضغط عبر التوربين، يخلق تيارا من البخار يكفى لتشغيل المولد منتجا الكهرباء. وتحظى الدورة المغلقة بميزات عن الدورة المفتوحة، حيث تحتـاج الأولـى إلـى توربين أصغر ولا تحتاج إلى مضخات ضغط منخفض أو مضخات إزالة غازات، تلك المضخات المستهلكة للقدرة. وفى حالة الدورة المفتوحة يمثل الماء العذب الذى نحصل عليه كمنتج ثانوى، منتجا بالغ الأهمية فى بعض المناطق.



شكل (١٢ – ١)

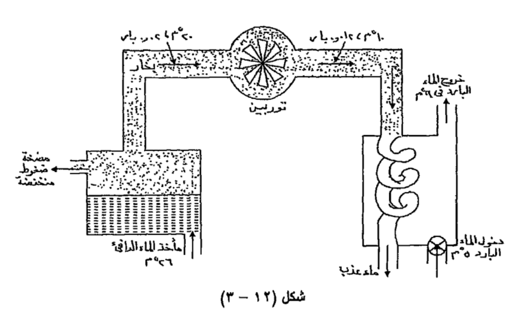
رسم تخطيطى لرصيف عائم لمحطة تحويل طاقة المحيطات الحرارية

(*) مبخر يتم فيه التبخير عن طريق خفض الضغط (المترجم)



شكل (١٢ – ٢)

محطة استغلال طاقة المحيطات الحرارية فى وضعية الدورة المغلقة



شكل (١٢ – ٣)

محطة استغلال طاقة المحيطات الحرارية فى وضعية الدورة المفتوحة

البحوث والتطوير:

نفذت بعض البلدان النشطة فى مجال بحوث وتطوير محطات استغلال حرارة المحيطات عددا من المشاريع، أو هى فى سبيلها إلى ذلك:

- اتخذت فرنسا قرارا بتشييد محطة بقدرة ٥ ميجاوات على الساحل بتاهيتى.
- تدعم الحكومة اليابانية مشروع تصميم محطة عائمة بقدرة ١٠ ميجاوات وهناك محطة على اليابسة مأخوذة فى الاعتبار. وتخطط هيئة **Tokyo Electric** لبناء محطة قدرتها ٢٠ ميجاوات على جزيرة ناورو كخطوة تالية بعد نجاح محطتها بقدرة ١٠٠ كيلووات التى أنشئت هناك.
- فى المملكة المتحدة صمم العلماء محطة بنظام الدورة المغلقة قدرتها ١٠ ميجاوات ويُخطط إنشاؤها فى البحر الكاريبى أو المحيط الهادى، إلى جانب محطة بنظام الدورة المغلقة على الشاطئ يعتزم بناؤها فى هاواى، مع الاستفادة من الماء العذب فى الزراعة.
- فى هولندا، تم إعداد دراسات الجدوى لإنشاء محطة عائمة (١٠ ميجاوات) فى جزر الأنتيل الهولندية، ومحطة شاطئية (١٠٠ كيلووات) فى (بالى).
- فى الهند تم تحديد موضع ملائم قرب ساحل جزيرة " لاكشادويب " فى "كافاراتى" وإن تم نقل الاختيار مؤخرا إلى مينيكوى. وقد أنجزت هيئة المستشارين الميتالورجيين والهندسيين المحدودة (رانشى) (بالهند) دراسات الجدوى لإقامة محطة من هذا النوع بقدرة ١ ميجاوات.

وعلى كل حال، لم تثبت جدوى اقتصادية لإقامة محطات من ذلك النوع بهذه الطاقات الضئيلة. ومن الأجدى اكتساب الخبرة للتعرف على مشاكل تشييد المحطات ذات السعات الصغيرة الجوهرية وحلها عن طريق البحث والتطوير.

التأثيرات البيئية:

قد يصحب تشغيل مثل هذه المحطات عدد من التأثيرات البيئية المحتملة وهى:

١) قد تتسبب معدلات السريان الهائلة من تيارات الماء الدافئ والبارد فى تغير الأنماط المناخية سواء محليا أو عالميا.

٢) قد يتحرر ثانى أكسيد الكربون الذى تحتوى عليه مياه أعماق المحيط وينطلق إلى الجو، عند ضخ هذا الماء ثم تسخينه فى المكثف. ويمثل انطلاق ثانى أكسيد الكربون خطرا حقيقيا للمحطات ذات النظام المفتوح حيث إن الماء الدافئ لابد وأن يخلى من الهواء قبل أن يجرى تبخيره فى المبخر الرذاذى.

٣) تؤثر هذه المحطات أيضا على الحياة البحرية. فقد تتأذى الأسماك والبيضات واليرقات التى تسحب إلى المحطة، كما أن التغيرات فى درجات الحرارة والملوحة قد تبدل النظام البيئى المحلى.

ملحوظات على (تحويل طاقة المحيط الحرارية):

يبدو أن محطات تحويل طاقة المحيطات الحرارية لن تلعب إلا دورا ثانويا كمصدر لتوليد الكهرباء فى المستقبل المنظور، فالتقنية يعيقها الموقف الاقتصادى

ويمكن إرجاع تكلفتها العالية إلى انخفاض كفاءة دورتها الحرارية لتوليـد القـدرة والتى تحتاج إلى معدات ذات حيز كبير يمكنها التعامل مع معدلات سريان المـاء الهائلة. وربما يمكن تقليص التكاليف بإدخال تحسينات علـى تـصميم المبـادل الحرارى وأنبوب الماء البارد. وعليه فإن الآمال المستقبلية فـى هـذه المحطـات منحصرة إلى حد كبير فى مواقع محدودة.

الباب الثالث عشر

طاقة الأمواج وموجات المد والجزر

مقدمـــة:

يستقبل المحيط الطاقة ويخزنها ثم يسربها خلال عمليات فيزيائية متنوعــة. وتوجد الطاقة فى شكل الأمواج وموجات المد والجزر، وهو ما جــرى ويجــرى التخطيط لاستغلاله.

ويتيسر استغلال طاقة المد والجزر فقط بتطبيق التقنيات المتاحة على نطاق تجارى. وحتى فى هذه الحالة فإنها تستغل فى مواقع استرشادية نصف صناعية تعد على الأصابع.

وربما يتأثر استغلالنا لطاقة الأمواج بإيقاع التطور التكنولوجى واتساع مداه. ومن الصعوبة بمكان أن نتنبأ بمدى احتمالية ثبوت جدواه وقدرته علــى المنافــسة. وتختلف طاقة الأمواج وموجات المد والجزر بوضوح وبدرجة كبيرة عن بعــضها البعض من حيث عملياتها الفيزيائية، وتقنيات الاستغلال ودرجة التطور. وسندرس كلا منها – فى هذا الباب – على حده.

طاقة موجات المد والجزر:

أصل موجات المد والجزر:

تنشأ موجات المد والجزر بتأثير الشد الجذبوى للقمر والشمس والمسلط على محيطات الأرض، وهى تدور حول نفسها. وتسبب الحركة النسبية لهــذه الأجــرام ارتفاعا وانخفاضا متكررين طبقا لعدد دورات التأثير المتبادل. وتشمل هذه الــدورة النصف يومية التى تنشأ من دوران الأرض داخل مجال جاذبية القمر، والذى يؤدى

إلى مدة دورة تبلغ ١٢ ساعة، ٢٥ دقيقة بين أقصى ارتفاعين لسطح الماء في المحيطات، ثم هناك دورة كل ١٤ يوما تتكرر كلما اتحد مجالا جذب الشمس والقمر ليحدثا أعلى وأدنى مد وجزر (ويسميان الموجتين العظمى والدنيا على التوالى)، وهناك دورة نصف سنوية تتأثر بميل مستوى مدار القمر وتؤدى إلى فترة تستمر حوالى ١٧٨ يوما بين أعلى موجتى مد وجزر فى الاعتدالين (فى مارس وسبتمبر). وتحدث الدورات الأخرى، مثل تلك التى تستمر ١٩، ١٦٠٠ سنة من التأثير المتبادل بين المجالات الجذبوية.

تصميم قناطر موجات المد والجزر:

يتكون المخطط الحديث للاستفادة من طاقة المد والجزر من قناطر أو سد يبنى معترضا لمصب نهر بحيث يكون مجهزا بسلسلة من البوابات ذات الصمامات التى تسمح بدخول الماء إلى الحوض. وتستخلص القدرة فى هذا المخطط بواسطة توربينات محورية تعمل على ساقط (*) **head** منخفض بدلا من ساقية مياه.

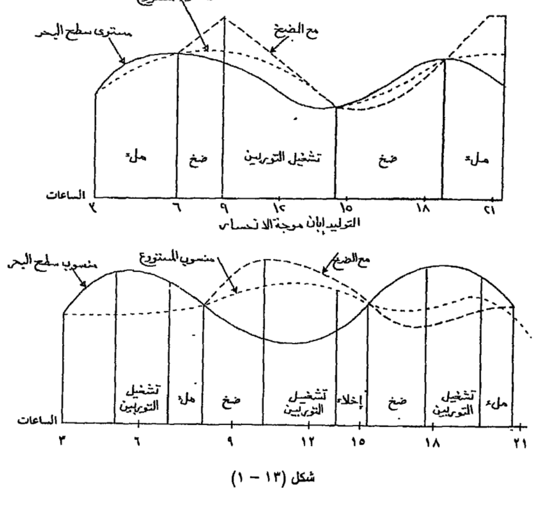
وتولد الكهرباء فى محطات موجات المد والجزر بتوربينات ضخمة من النوع المحورى يصل قطرها إلى ٩ أمتار. وبسبب اختلاف وتذبذب ساقط المياه، وزوايا الموزع فإن التوربين وريشاته (أوكليهما) تعدل أوضاعهما بما يكفل أقصى كفاءة ممكنة. كذلك إذا كان التوربين سيستعمل فى كلا الاتجاهين (لتوليد الكهرباء ولضخ المياه بمرورها فى الاتجاه العكسى) فإن تعديلات يجب إدخالها لتكفل ذلك وتنظمه.

وضعيات التشغيل:

يمكن تشغيل قناطر موجات المد والجزر بإحدى وضعيات ثلاث: توليد الكهرباء فى فترة الانحسار، التوليد فى أثناء فترة الفيضان، أو التوليد فى الاتجاهين.

(*) الساقط هو الفرق بين منسوبى الدخول والخروج فى سطح المائع (المترجم)

وفى توليد الانحسار يسمح لموجة المد أن تنساب إلى الداخل خلال البوابات والتوربينات، ثم تحجز فى الداخل حتى تنحسر الموجة بدرجة تكفى لخلق فارق منسوب ملائم. وعند ذلك يطلق الماء خلال التوربينات مولدا الكهرباء. وتعلق عملية إطلاق المياه حتى تنقلب الموجة وتبدأ فى الارتفاع، متسببة فى انخفاض فارق المناسيب إلى مادون نقطة الحد الأدنى للتشغيل. وحيث يرتفع الماء فإنه يدخل مرة ثانية إلى الحوض، مكررًا الدورة كما فى شكل (١٣ – ١).



شكل (١٣ – ١)

توليد القوى فى اتجاهين

ويعكس توليد الفيضان، دورة توليد الانحسار، إذ تولد الكهرباء عندما تفيض مياه المد إلى داخل الحوض. وليس لهذه التقنية كفاءة عالية لأن الطبيعة المنحـــدرة لحواف الحوض ينتج عنها – عموما – مردود أقل من الكهرباء.

فى التوليد فى اتجاهين، تستخلص الطاقـــة مـــن كـــلا مـــوجتى الانحـــسار والفيضان. وهى لا تغل – عادة – طاقة أكبر من تلك الناتجة من توليد الانحـــسار، لأن محاولة توليد القدرة خلال نوبة الفيضان ستحد مـــن إعـــادة مـــلء الحـــوض، وبالتالى تحد من مقدار الطاقة التى يمكن توليدها خلال نوبة الانحـــسار. ويمكـــن تشغيل التوليد فى الاتجاهين عبر فترات زمنية أطول من اليوم، ومن ثم يكـــون ذا ميزة فى الأماكن التى يحتاج فيها إلى تغذية محددة بالكهرباء.

وقد شغلت قناطر "لارانس" بفرنسا أصلا بهذه الطريقة.

ويحبذ ضخ الماء لقدرته على زيادة الطاقة المستفادة، فبعكس أداء التـــوربين بحيث يعمل كمضخة يمكن توليد ساقط (فرق منسوب). وتومئ دراسات الجـــدوى فى المملكة المتحدة إلى عدد من خطط توليد الطاقة من موجـــات المـــد والجـــزر. إلا أن العائد فى الطاقة بالضخ – إذا ما قورن بالتوليد بالانحسار قليل وإن كـــان ذا فائدة، إذ يتراوح ما بين ٥، ١٥%.

البحوث والتطوير:

لم تبدأ المحاولات الجادة لتطوير القناطر من أجل توليد الكهربـــاء إلا بعـــد ١٩٦٠. أما الآن فهناك تقدم ملموس فى أساليب تشييدها وتصميم الآلات وتقنيـــات تشغيلها. وقد استهدفت جهود التطوير بنسبة كبيرة تقليل النفقات الرأسمالية أو فترة التشييد أو كليهما، وزيادة الكهرباء المولدة وتقليص احتمالات الأضـــرار البيئيـــة. وقد أقيمت حتى الآن محطات قوى قليلة لاستغلال موجات المد والجـــزر، كانـــت

أولاها وأكبرها قناطر بقدرة ٢٤٠ ميجاوات لتوليد الكهرباء تجاريا فى ١٩٦٠ فى "لارانس". ولقد انقضى على تشغيلها بنجاح الآن أربعون عاما(*). والمحطات الأخرى تشمل محطة بقدرة ١٨ ميجاوات فى أنابوليس، ومحطة بقدرة ٠,٤ ميجاوات "فى كيسلاى جوها" بروسيا، ومحطة بقدرة ٣,٢ ميجاوات فى جيا نجهيا بالصين (جدول ١٣ – ١).

جدول (١٣-١)

محطات قوى موجات المد والجزر القائمة

الموقع	المد المتوسط لموجة المد والجزر بالمتر	مساحة الحوض كم ٢	القدرة المركبة ميجاوات	الطاقة التقريبية المولدة سنويا جيجاوات ساعة	تاريخ الدخول فى الخدمة
لارانس (فرنسا)	٨,٠٠	١٧	٢٤٠,٠٠	٥٤٠	١٩٦٦
كيسلاى جوها (روسيا)	٢,٤	٢	٠,٤	–	١٩٦٨
جيا نجهيا (الصين)	٧,١	٢	٣,٢	١١	١٩٨٠
أنا بوليس (كندا)	٦,٤	٦	١٧,٥	٣٠	١٩٨٤
مواقع مختلفة بالصين	–	–	١,٨	–	–

(*) اعتبارًا من عام صدور هذا الكتاب (المترجم)

وأكثر المواقع فى الهند جاذبية لتطوير الإفادة من قوى المد والجـزر هـو خليج (كامباى) وخليج (كاتش) على ساحلها الغربى، فهناك حد أقصى لنطاق المـد والجزر يبلغ (١١، ٨ م)، ونطاق متوسط يبلـغ مـا بـين ٦,٧٧، ٥,٢٣م لهـذين الموقعين على الترتيب. وبدلتا نهر الجانج فى سوندربانز بغرب البنجـال مواقـع طيبة لاستغلال قوى المد والجزر على نطاق صغير. فالحد الأقصى لنطـاق المـد والجزر فى سوندربانز يبلغ ٥ م ومتوسطه ٢,٩٧م. ويبلغ المخـزون ذو الجـدوى الاقتصادية من قدرات المد والجزر بالهند نحو ٨٠٠٠ – ٩٠٠٠ ميجـاوات منهـا حوالى ٧٠٠٠ ميجاوات بخليج كامباى وحوالى ١٢٠٠ بخليج كاتش.

المضاعفات البيئية:

الطاقة من المد والجزر غير ملوثة، ويمكن أن تحل محل أنواع الوقود مـن فحم وهيدروكربونات. وبحلولها محل الفحم يمكن لقناطر المد والجـزر أن تحـول دون انبعاث مليون طن من ثانى أكسيد الكربون لكل تتراوات ساعة مـن القـدرة المولدة. ومن جهة أخرى تحمى القناطر الشواطئ الساحلية من عوادى موجات المد والجزر العاتية. وربما تغير مشروعات الطاقة من المد والجزر، من النظم المناخية المحيطة بمصبات الأنهار، ومن ثم يتوجب تقييم الآثار البيئية المترتبـة وتحليلهـا بالعناية اللازمة، وتحديد مدى إمكانية تقبلها قبل الشروع فى تنفيـذ أى مـشروع. ويجب أن تشخص عناصر النظم البيئية المحيطة بالمصبات للتأكد من نوعية المياه ونوعية المواد المترسبة وتعداد الطيور والأسماك. وحتى اليوم، لم تخضع محطات القوى المعتمدة على موجات المد والجزر لرصد شامل لآثارها البيئية. ومـع هـذا فمعظم خبرات تشغيلها عمليا ذات مردود إيجابى رغم بقاء بعض الآثار التى لم يتم التأكد منها، والتى تحتاج للمزيد من التحريات، وبوجه خاص على مستوى الموقـع

المنتقى بعينه. ولم تظهر حتى الآن عوامل أساسية تمنع التوسع فى إنشاء محطات القوى المدية، مع إيلاء العناية الواجبة لمخططات تصميمها.

طاقة الأمواج:

تنشأ الأمواج نتيجة التأثير المتبادل بين الرياح وسطح البحر، ولها طاقة حركية تعبر عنها سرعة المياه، كما أن لها طاقة وضع هى دالة فى مقدار المياه المنزاحة عن المنسوب المتوسط لسطح البحر. وتتوقف كمية الطاقة التى تنقلها الرياح إلى المحيط على سرعتها، والمسافة التى تتبادل عبرها التأثير على المياه والفترة الزمنية لهذا التأثير. وتعتمد سرعات الأمواج على طولها، فمن شأن الأمواج الطولية أن تتحرك بسرعة أكبر.

وقدرة موجة ما تقاس بدلالة المعدل الذى تنتقل به طاقتها عبر خط طوله متر واحد فى اتجاه عمودى على اتجاه حركتها، ويعبر عنها بوحدات كيلو وات لكل متر من صدر الموجة **wave front**. والقدرة فى الموجة ثابتة تقريبا وحتى أعماق كبيرة، مع وجود فاقد بسيط يعود إلى لزوجة الماء وإلى التأثير المتبادل بينها وبين الجو. وبمجرد تكون الموجة فإنها تتحرك فى اتجاه تكونها حتى بعد أن تخمد الرياح. ويفسر ذلك ما نلاحظه أحيانا من انتفاخ طويل فى بحر هادئ، فربما يكون أثرا باقيا من عاصفة نائية حدثت من عدة أيام خلت.

الإمكانيات والتقنية:

يقع أعلى تركيز لطاقة الرياح ما بين خطى عرض ٤٠°، ٦٠° من نصفى الكرة الأرضية. وتصلح المواقع حول خطوط العرض ٣٠° لاستغلال طاقة

الأمواج، حيث تسود الرياح التجارية المنتظمة لدى خطوط العرض تلك. ويمكن أن تسبب الرياح التى تهب عبر مسافات مديدة فوق المحيطين الأطلنطى والهادى أمواجا ترتفع لعشرات الأمتار وبمسافات بين قممها تربو على المائة متر، وبمياه منزاحة تصل كتلتها إلى عدة أطنان فى كل موجة. وساحلا أوروبا والولايات المتحدة الغربيان، وسواحل نيوزيلنده واليابان تصلح على نحو خاص كمواقع لاستغلال طاقة الأمواج.

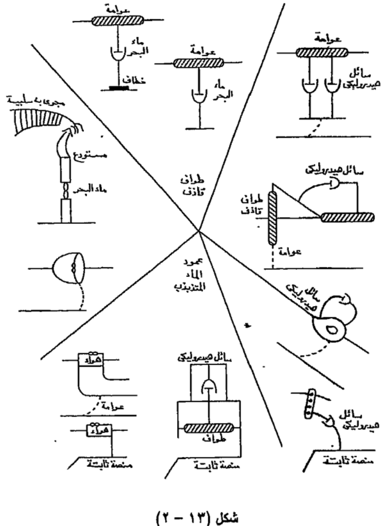
وقد بدأ فى الهند نشاط البحوث والتطوير فيما يختص باستكشاف إمكانيات طاقة الأمواج فى "مركز هندسة المحيطات " التابع للمعهد الهندى للتكنولوجيا بمدراس عام ١٩٨٢. وتشير التقديرات إلى أن إمكانيات طاقة الرياح السنوية على طول السواحل الهندية تتراوح ما بين ٥، ١٥ كيلووات لكل متر. ومن ثم تصل الإمكانيات نظريا – عبر سواحل طولها نحو ٦٠٠٠ كم – إلى ٦٠٠٠٠ ميجاوات تقريبا. وعلى أية حال، فالإمكانيات الفعلية والاقتصادية تقل عن ذلك بكثير.

التقنيات:

أجهزة استغلال طاقة الأمواج داخل البحر على المقياس الكبير:

تستخلص هذه الأجهزة الطاقة من البحر، محولة إياها إلى حركة ميكانيكية أو فى صورة طاقة ضغط لمائع ما. وليس من اليسير تحويل طاقة الأمواج إلى كهرباء بسبب انخفاض تردد تلك الأمواج (حوالى ١,٠ هيرتز)، والتى ينبغى أن ترفع إلى سرعات الدوران الدارجة الاستعمال فى المعدات الميكانيكية والكهربية لمحطات القوى (نحو ١٥٠٠ لفة فى الدقيقة). ومن أجل استخلاص الطاقة من الموجة تتعامل المعدات معها فى عدة صور (انظر شكل ١٣-٢)، وتكون بعض هذه المعدات فى هيئة هيكل طاف يسمى بالطوف القاذف **heaving float**،

الذى يربط بإحكام على سطح البحر أو على مقربة منه، وهناك هياكل أخـــرى ذات مفصلات يطلق عليها توابع السطح surface followers تتحرك تبعا لشكل ســطح الأمواج عن طريق جهاز له شكل حقيبة تنتفخ بالهواء مع تدفق الموجـــة، كمـــا أن هناك هياكل تحتوى على عمود ماء متذبذب، يعمل ككباس يضغط الهواء (قد تكـــون هذه المعدات ثابتة أو طافية على سطح البحر أو تكون تحت الـــسطح) ويجـــب أن يقتصر عمل كل هذه المعدات على مقاومة قوى الأمواج.



شكل (١٣ - ٢)

معدات استغلال طاقة الأمواج

أجهزة الإخماد والإضعاف والامتصاص الموضعي:

نحصل على أقصى طاقة من الأمواج عندما يركب العديد من الأجهزة بطول محور خطى عمودى على اتجاه الموجة، وهو ما يسمى بوضع الإخماد **terminatormode**. وفى هذا الوضع تمتص الطاقة عن طريق إخماد الأمواج. وعند استخلاص الطاقة من صدر موجة لها نفس طول خط الأجهزة يكون الحد الأقصى لمعدل الاقتناص هو الواحد الصحيح. أما فى وضعية الإضعاف فيكون محور الجهاز موازيا لاتجاه الموجة. والجهاز فى هذا الوضع والذى يقتصر استخدامه على البحار الضخمة يتعرض لقوى لا يستهان بها. ولا يزيد معدل اقتناص الطاقة فى جهاز الإضعاف هذا عن ٦٢% من معدلها فى حالة جهاز إخماد له نفس الطول.

ولأجهزة الامتصاص الموضعية بعد طولى يقل عن طول الأمواج. ورغم أن أجهزة الامتصاص الموضعية هذه قادرة على اقتناص الطاقة من كل الجهات بنفس القدر، فإنها غير قادرة على اقتناص الطاقة من الأمواج الضخمة بسبب محدودية حجمها أو حيزها.

طاقة الأمواج على المستوى الصغير على طول الخط الساحلى أو على مقربة منه:

يرتبط توليد الكهرباء من طاقة الأمواج الذى يصل حجمه إلى مستوى الجيجاوات (10^{9} وات) لتوزيعها عبر الشبكة العامة، يرتبط بالمعدات المركبة داخل البحار. أما الأجهزة الساحلية فنظرا لمحدودية المواقع المتاحة التى تصلح على الساحل، ولانخفاض إمكانيات الطاقة فى أمواجها، فلا تعد مناسبة للتوزيع للمستهلكين عبر مسافات بعيدة، وإنما باستطاعتها توفير قدرات عند مستوى الميجاوات (10^{6} وات) للوفاء بالاحتياجات المحلية، ومنافسة القدرات المولدة

بوحدات الديزل. وتشمل هذه المعدات نوع تابخـــان **Tapchan** النرويجـــى الـــذى استعمل فى مناطق ذات نطاق مدى منخفض. وتدخل الأمواج إلى (التابخان) خلال مجرى مسلوب، حيث يجرى تركيزها بما يؤدى إلى زيادة ارتفاع قمتها. ويتـــدفق الماء - عند خروجه من النهاية العليا للمجرى - إلى داخل خزان، ثم يعـــود إلـــى البحر بعد مروره على توربين. ويعمل جهاز تابخان ذو قدرة ٣٥٠ كيلووات قرب (بيرجين) بالنرويج فى الوقت الحالى. وقد تؤخذ استراتيجيات أخرى فى الحـــسبان، تربط الأخاديد العميقة - الطبيعية منها أو الصناعية - بعمود مياه متذبذب بتوربين آبار. ومحطات قوى الأمواج المقامة بقرب السواحل على أعماق من ١٠ إلـــى ٢٥ مترا، توفر إمكانات أكبر مما توفره الأجهزة الساحلية. وقدرة الموجة الوافدة أقوى عند الابتعاد عن الشاطئ، كما أن هذه المواقع تتعرض لمحاذير أقل مـــن نـــاحيتى البيئة وهياكل البنية التحتية.

البحوث والتطوير:

تتأثر محطات القوى المقامة على الخط الساحلى بمحددات بيئيـــة وأخـــرى تمليها هياكل البنية التحتية. وعلى أية حال، إذا كان لطاقة الأمواج أن تسهم إسهاما ذا شأن، فلا بد وأن تأتى من أمواج المواقع البحرية أو بقرب الشواطئ، هذا وتدعم العديد من الدول الأبحاث فى مجال طاقة الأمواج، وفيما يلى أمثلة لذلك:

- شيدت الهند معدات لكسر حدة الأمواج تحتوى على جهاز عمـــود ميـــاه متذبذب وتشمل توربين آبار ذا قدرة ١٥٠ كيلووات، بعيدا عن الـــساحل فى مدراس، ومن المخطط أن تتخطى قدرته المركبة رقم الميجاوات.
- أقامت الصين جهازا على الساحل ذا عمود مياه متذبذب بقـــدرة ٣ كيلـــو وات بأخدود صناعى وتوربين آبار بالقرب من جوانجخون على نهـــر بيرل.

- أنجزت اليابان بحوثا مكثفة شملت تجارب بالبحار علـى الأجهـزة مـن نوعية أجهزة الإخماد الطافية والأجهـزة الطافيـة ذات عمـود الميـاه المتذبذب، والجهاز البندولى وجهاز عمود مياه متذبـذب مقـام علـى الشاطئ. وقد تم اختبار جهاز قدرة بالأمواج ذى عمود ميـاه متذبـذب، وتوربين آبار بقدرة ٤٠ كيلووات فى مينـاء "سـاكاتا" ببحـر اليابـان الشمالى.
- طورت السويد هيكلا عائما – تم بالفعل اختباره – يقوم بـإدارة مـضخة ذات خرطوم موصلة بمرساة معزولة. كما أنها تطور جهازا دوارا فى اتجاه أفقى يستخدم فى المياه الضحلة، فى حين تقدر المملكـة المتحـدة مصادرها من طاقة الأمواج داخل البحـار والتـى يمكـن – فنيـا – استغلالها بمقدار ٦ جيجاوات. ولقد تم اختبار نموذج لجهاز شاطئ ذى عمود مياه متذبذب بقدرة اسمية ٧٥ كيلو وات ومردود طاقـة سـنوى يقدر بحوالى ٣٠٠ ميجاوات. ساعة، وذلك على الجزيـرة الإسـكتلندية (إسلاى Islay)، وهو يسهم فى تزويد شبكة الجزيرة بالكهرباء.

الاقتصاديات:

تتكلف عمليات تصميم وتجميع وإقامة محطة قوى كبيرة بطاقة الأمواج بعيدا عن الشاطئ، بما يلزم لها من توصـيلات كهربائيـة، عـدة آلاف مـن ملايـين الدولارات. وبالنظر إلى اعتبارات التعديل فى التصميم، يمكن تـشييد مثـل هـذه المحطة للقوى على مراحل، كما يمكن البدء فى الحصول على الطاقة حتـى قبـل تمام إنشائها. ويمكن إقامة محطات القوى القريبة من الشاطئ على مقياس مـصغر فى مكان ما ثم تقطر إلى المكان المنشود حيث يتم تركيبها. لقد أنـشئت محطـات لطاقة الأمواج بطول الساحل مزودة بصناديق لكسر الأمواج فى المملكة المتحـدة والنرويج واليابان والهند، ولم تعد تمثل أية صعوبة فنية. ويفيد تحليـل اقتـصادى

أجرى لأحد عشر جهازًا لاستغلال طاقة الأمواج بأن تكلفة إنتاج الكهربـــاء منهـــا (لعام ١٩٨٧) مقدرة بالسنت الأمريكى لكل كيلووات ساعة) تعبر عنها الصيغة:

سعر الكهـــرباء = ١١٢,٩ ÷ قـــدرة الموجـــة مرفوعـــــة لـــلأس ٠,٦٤ (حيث قدرة الموجة مقدرة بالكيلووات لكل متر). ويقام الكثير من أجهزة اســـتغلال قدرة الأمواج فى وسط البحر لإنتاج كميات أكبر من الطاقة المفيدة. ويشار إلى أن توليد هـــذه القوى بكميات ضخمة كفيل بخفض تكلفة إنتاج الوحدة منها بمقدار ١٥ إلى ٢٥ %.

التأثيرات البيئية:

يمكن لطاقة الأمواج أن تحل – بصورة جزئية – محل الوقود الأحفـــورى، ونتيجة لهذا سينخفض انبعاث الغازات المؤدى للاحتباس الحرارى وتلوث الجـــو. وقد تكون هناك بعض التأثيرات البيئية المحلية التى تتوقف على الموقع المنتقـــى. وتتضمن الفوائد منها خلق مناطق من الماء المحبوس الـــساكن الكفيـــل باجتـــذاب الأسماك والطيور البحرية وعجول البحر والحشائش البحريـــة. ولابـــد مـــن أخـــذ التأثيرات المحتملة لنقاط منع الأنسداد المقامة بالموقع فى الحسبان. وربمـــا تتـــأثر البيئة الساحلية بالمثل بمحطات قوى الأمواج التى ســـتغير مـــن المنـــاخ المـــوجى المحلى. وقد تمثل أجهزة محطات الأمواج مصادر خطر للسفن، نظرا لقلة ارتفـــاع الجزء البارز منها فوق سطح الماء. وهذه الأجهزة ربما تكون غير منظورة نـــسبيا حتى بالنسبة لأجهزة الرادار.

الباب الرابع عشر

الطاقة من الهيدروجين

مقدمة:

يُنظر إلى الهيدروجين فى الأغلب على أنه وقود المستقبل. فاحتراقه نظيف لا ينجم عنه تلوث، كما أنه – كوقود – سهل النقل – وباستخدام الهيدروجين ستختفى – بصورة عملية – كل مشاكل التلوث التى تصاحب استخدام أنواع الوقود الأحفورى حاليا، فبخار الماء هو المكون الرئيسى فى نواتج الاحتراق. ويمكن فعليا إنتاج الوقود بفصل مكونى الماء، وناتج احتراقه هو ببساطة الماء، فى حين يمكن الاحتفاظ بالأكاسيد النتروجينية – الناجمة كمنتج ثانوى – عند مستويات منخفضة. وكغاز، يسهل نقله عبر الأنابيب لمسافات طويلة وبتكلفة زهيدة. وعند نقاط الاستهلاك يسهل استخدامه كوقود فى العديد من التطبيقات كآلات الاحتراق الداخلى وخلايا الوقود والأفران.

اكتشف الهيدروجين للمرة الأولى على يد الكيميائى البريطانى "هنرى كافنديش" باعتباره نوعا من الهواء القابل للاشتعال ثم أعيد اكتشافه عام ١٧٨٣ عن طريق الكيميائى الفرنسى "انتين لا فوازييه" باعتباره أحد مكونى الماء. وفى سنة ١٩٢٣ استحدث "هالدين" فكرة استخدام طاقة الرياح لإنتاج الكهرباء التى يمكن استعمالها فى التحليل الكهربى لفصل مكونى الماء للحصول على الهيدروجين. وفى عام ١٩٣٢ سجل إنين براءة اختراع فكرة استخدام الهيدروجين لتشغيل آلات الاحتراق الداخلى. كما تنبأ "سيكيرسى" فى ١٩٣٨ باستخدام الهيدروجين كوقود للطائرات، وقد جرى سنة ١٩٥٦ بنجاح تشغيل طائرة تعمل بالهيدروجين عن طريق وكالة ناسا بالولايات المتحدة.

الهيدروجين كوقود بديل:

الهيدروجين – شأنه شأن الكهرباء – حامل ثانوى للطاقة، أى أننا فى حاجة لإنتاجه – إلى طاقة أولية (نووية أو شمسية أو مائية أو حتى أحفورية). وهناك ٥ مواضيع تحتل أهمية خاصة لدى إدخال الهيدروجين كمصدر للطاقة على نحو واسع:

١ – الإنتاج.

٢ – التخزين والنقل.

٣ – تقنية استخدام الهيدروجين كمصدر للطاقة.

٤ – الأمن الصناعى.

٥ – الاقتصاديات والإدارة.

الإنتاج:

ينتج الهيدروجين بصفة عامة بإحدى الطرق الثلاث التالية:

١ – التحليل الكهربائى للماء.

٢ – تحليل الماء بالحرارة.

٣ – الطرق الحرارية – الكيميائية.

فى الطريقة الأولى تستخدم الطاقة الكهربائية فى تحليل الماء وفى الطريقة الثانية تستعمل الطاقة الحرارية عند درجة حرارة عالية جدا (أعلى من ٣٠٠٠ درجة مئوية) فى تحليل الماء إلى هيدروجين وأكسجين. أما الطريقة الثالثة فتعد أكثر الطرق رواجا على المنظور البعيد. فهى تعتمد على سلسلة معقدة من التفاعلات البينية بين الطاقة الأولية، والماء، وبعض المواد الكيميائية لإنتاج

الهيدروجين فى درجات حرارة تقل بكثير عن تلك اللازمة لتحلل الماء بـــالحرارة. وتعتمد عملية التحليل الحيوى الضوئى Photobiolysis على مفعول عوامل مساعدة معينة لإنتاج الهيدروجين من الماء عن طريق مفعول ضوء الشمس فـــى درجـــات الحرارة المعتادة السائدة. والهيدروجين المنتج بالتحليل الكهربى من مصادر طاقـــة الرياح أو الشمس مباشرة والمستعمل فى المركبات ذات خلايا الوقـــود لا يعطـــى انبعاثات خلال النقل. وهيدروجين التحليل الكهربائى بديل مستحب فى مناطق مثل أوروبا، وجنوب وشرق آسيا وشمال إفريقيا وجنوب غرب الولايات المتحدة حيـــث المستقبل المحدود للوقود من المصادر الحيوية. ولا تتطلب مـــصادر الطاقـــة مـــن الرياح أو من الشمس حيزا كبيرا من الأرض مقارنة بالذى تتطلبه مصادر الوقـــود الحيوى.

ولعل الانتقال إلى اقتصاد طاقة يمكن أن يلعب فيه الهيدروجين دورا أساسيا تحدث به طفرة لدى استخلاص الهيـــدروجين مـــن المخلفـــات الحيويـــة. وهـــذا الهيدروجين المستخلص من النفايات الحيوية والذى يصل للمستخدمين فـــى قطـــاع النقل يكلف – نمطيا – نصف تكاليف إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربـــائى مـــن مصادر الرياح أو الكهروضوئية... والسيارة ذات خلية وقود تعمل بالهيـــدروجين المستخلص من النفايات الحيوية من شأنها أن تتنافس مع سيارة تعمل بالجـــازولين كآلة احتراق داخلى.

والهيدروجين هو أكثر الغازات قابلية للاشـــتعال تحـــت درجـــة الحـــرارة والضغط الطبيعيين. ويمكن أن يخزن فى هيئة غاز أو سائل أو مركب كيميـــائى. ويفضل التخزين الكيميائى للهيدروجين فى الاستعمالات المعملية وما شاكلها. وليس تخزين الهيدروجين فى صورته السائلة بالعملية الآمنة ولا الاقتصادية، علـــى أنـــه مفيد كأفضل وقود غنى للصواريخ.

ويتم تخزين الهيدروجين فى السيليكا المنصهرة، وهو وسط تخـزين عـالى الحرارة. والتخزين تحت سطح الأرض للهيدروجين فى صورته الغازية بمقـادير كبيرة جدا مطروح كبديل آمن ذى جدوى اقتصادية عالية.

النقل:

سيكون لنقل الهيدروجين فى حافلات تحت ضغط عـال أهميتـه، وبـصفة خاصة لشبكات التوزيع المحدودة، إلا أن نصيب هذه الوسيلة من النقـل يتوقـع أن يتقلص مع اكتمال إقامة المنظومات المتطورة (بما فيها شبكات خطوط الأنابيـب). وستبدو أهمية نقل الهيدروجين السائل لدى التوزيع على مراكز الاستهلاك الضخم. ويمكن بالمثل نقله كما ينقل غاز الطهى، مع بعض التعديلات فى خطوط الأنابيب.

الاستغلال:

لقد توطدت إمكانية استخدام الهيدروجين رأسا كوقود فى المركبـات. ولقـد أظهرت دراسات عديدة مدى أفضلية الهيدروجين السائل كوقود للطائرات الأبطـأ والأسرع من الصوت على السواء. والطائرات التى تطير بالهيدروجين قد اختبرت فعلا منذ ١٩٥٦، ويدرس حاليا تحويل طائرات الخطوط الجوية إلى نظـام الـدفع بالهيدروجين السائل. وفيما يتعلق باقتصاديات النقل الجوى، فالهيدروجين الـسائل يمثل بديلا مفضلا مقارنة بوقود الكيروسين التقليدى، حيث يلبـى الأول متطلبـات خفة الوزن.

إجراءات الأمان:

نظرا لقابليته للانتشار السريع وسهولة الاحتراق، يمثل الهيدروجين – مـن ناحية الأمان – مشكلة. ويلزم لمنظومات الوقود الهيدروجينى تجهيزات خاصة مثل مصائد اللهب، وحواجز الاشتعال العكسى(*) ومجسات استشعار التسرب.

(*) حاجز الاشتعال العكسى **flash back arrestor** : هو جهاز يستعمل بالـذات فـى لحـام الأكـسى – أسيتيلين لمنع اللهب من الانتشار والإمساك بالجهاز (المترجم)

نواحى التقدم فى وسائل تخزين الهيدروجين:

باعتباره حامل طاقة ثانويا مستحدثا، لابد للهيدروجين كى يغزو الأسواق من أن يحقق عددا من المتطلبات مثل:

أ) لابد أن تكون مجالات استخداماته ذات أهمية كبرى فى سوق الطاقة، وينبغى أن تتوفر فى استخدامه – ما أمكن العناية اللازمة.

ب) يجب أن يتم نقله وتداوله بأقل تكلفة ممكنة مع توخى الأمان اللازم.

جـ) ينبغى أن يجرى تخزينه بطريقة مجدية فنيا واقتصاديا.

وفيما يتعلق بأولى المتطلبات لانتشار الهيدروجين كوقود فى السوق، فيتوجب عدم اعتباره منافسا للتطبيقات الكهربائية النمطية، وإنما يفضل اعتباره وقودا يغطى احتياجات السوق المستقبلية، ويكون استعماله النمطى إحلاله محل الوقود الأحفورى الغازى والسائل المستعمل الآن على نطاق واسع، وعلى وجه الخصوص فى أغراض التسخين ووسائل المواصلات. وفى هذه الحالات، حيث يمكن اعتبار الكهرباء بديلا هى الأخرى، تكون عناصر تكلفة النقل والتوزيع والتخزين هى الفيصل الحاكم فى اختيار البديل.

وفيما يخص المتطلبين الأخيرين، يمثل استعمال الهيدروجين ميزة جلية، فنقل الهيدروجين لمسافات طويلة وباعتماد ذات التقنية الحالية المستعملة مع الغاز الطبيعى يتوقع أن يكون أقل كلفة من خطوط نقل الكهرباء عالية الجهد، إلا أن سهوله تخزين الهيدروجين تبقى هى الميزة الأساسية التى تؤخذ فى الحسبان. وتخزين الكهرباء من وجهه النظر الفنية طبعًا هو لغة العصر، بيد أنها تعانى من انخفاض كثافة الطاقة وارتفاع التكاليف. ومن ثم فإن تخزين الكهرباء على المقياس الكبير غير ذى جدوى عمليًا. وعلى نقيض ذلك ينهض الدليل على أن كثافة الطاقة العالية، والتكاليف المنخفضة نسبيا فى حالة نقل الهيدروجين وتخزينه تعوضان

تكلفة إنتاج الهيدروجين المرتفعة. وارتفاع تكلفة إنتاج الهيدروجين واضح فى حالة اتباع طريقة الإنتاج الرئيسية مستقبلا وهى – اسميا – التحليل الكهربى، لاعتبارات التكلفة الرأسمالية ومدى كفاءة عملية التحليل الكهربى. ومن هنا، فليس هناك سوى رخص تكاليف النقل والتوزيع والتخزين ميزة تؤكد استعمال الهيدروجين على المقياس الكبير فى المستقبل فى منظومات الطاقة.

وفى حالة إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربى ستتجلى مشكلات التلوث لدى موقع إنتاج الكهرباء، إلا إذا استعملت طاقة متجددة كهرومائية أو شمسية (المرجع كاربتيس **Carpetis** – ١٩٨٤). ولا يمكن الانتقال إلى هذه المنظومات للطاقة التى لا تستخدم الوقود الأحفورى لإنتاج الهيدروجين والكهرباء إلا بشكل تدريجى وعبر عدة عقود. وفى ذات الوقت، ستستخدم كميات هائلة من مصادر الطاقة الأحفورية، مثل النفط الخام والغاز الطبيعى بكثافة، مما سيجعل من انبعاثات ثانى أكسيد الكربون وما يصاحبها من ظاهرة الاحتباس الحرارى، مشكلة جدية. على أية حال وكما بين بيشكا **Peschka** حديثا (١٩٩٢) فإن عملية تكسير الميثان (تحلله بتأثير عامل مساعد) والتى سلف أن اقترحها بولينزوستين **Pohlenz and stine** فى ١٩٦٢، يمكن تطبيقها لإنتاج الهيدروجين من المواد الخام الأحفورية المحتم استخدامها، دون انبعاث لثانى أكسيد الكربون: وإلى جانب الهيدروجين، لا ينتج سوى الكربون فى صورته العنصرية، والذى يمكن ترسيبه كمخلفات، أو استخدامه بدلا من الفحم فى العمليات الكيميائية. وهذا الإنتاج للهيدروجين الخالى من ثانى أكسيد الكربون من شأنه أن ييسر الاستعمال الوسيط لوقود نظيف دونما حاجة إلى التبديل فى هيكل الإمداد بالطاقة الأولية الحالى. وحتى فى هذه الحالة فقابلية الهيدروجين للتخزين ذات أهمية كبرى من حيث جدواها الاقتصادية.

وللتركيز على الجوانب الفنية والاقتصادية فى تخزين الهيدروجين أهميته العظمى. ويمكن العثور على معلومات أكثر تفصيلا فى مرجعى كاربيتس

Carpetis (١٩٨٨)، ووبليامسون وإديسكوتى (١٩٨٦)، واللذين يناقشان كذلك جوانب نقل الهيدروجين وتوزيعه، فى حين تتواجد معلومات خاصة عن تقنية الهيدروجين السائل فى مرجع بيشكا (١٩٩٢).

تصنيف منظومات وأجهزة تخزين الهيدروجين:

١) **منظومات تخزين ضخمة ومثبته:** تقام منظومات التخزين هذه – بصورة نمطية – فى مواقع الإنتاج، إلى جانب نهايات خطوط المواسير وغيرها من وسائل النقل. وكشكل نمطى تشمل المنظومة – إلى جانب الأجزاء المكونة اللازمة للتخزين مثل الخزان، مكونا لمنظومة استهلاك القدرة، أى الآلات أو المصنع كالضاغطات، ومعدات الإسالة. وبالتبعية فربما تشمل التكاليف المناظرة، تكاليف رأسمالية ملموسة تعتمد على حجم القدرة، ومفردات تكاليف توليد القدرة.

٢) **منظومات تخزين صغيرة وثابتة:** وغالبا ما تستعمل كمرحلة تخزين متوسطة، كالمواقع الصناعية على سبيل المثال. وهنا بطبيعة الحال ترتبط التكاليف بحجم التخزين.

٣) **منظومات تخزين متحركة للنقل والتوزيع:** وتشمل هذه المنظومات حاملات وقود رئيسية **bulk carriers** مثل فناطيس الهيدروجين السائل (LH_2) أو المنظومات الأصغر مثل مقطورات الهيدروجين السائل والغازى. وتشمل عناصر التكاليف فى هذه الحالة تكاليف استثمارية يتوقف حجمها على السعة، إلى جانب تكاليف التشغيل.

٤) **مستودعات وقود متحركة:** وهى عبارة عن خزانات تستعمل لتخزين الهيدروجين المستخدم كوقود للمركبات المتحركة على ظهر المركبة ذاتها. وفى هذه المركبات المتحركة بقوى الهيدروجين، ربما يؤدى

وزن الصهريج اللازم فى بعض أساليب تخزين الوقود، إلـى ارتفـاع مفرط فى استهلاك الوقود. وتتوقف تكاليف التشغيل لكل وحدة مسافات بدرجة كبيرة ليس فقط على تكلفة طاقة الهيدروجين فى محطة الوقـود، وإنما بالمثل على أسلوب التخزين على ظهـر المركبـة وعلـى نـوع المركبة ونطاق سرعاتها.

أساليب تخزين الهيدروجين:

سنتناول – بداية – أساليب تخزين الهيدروجين، والتى قد تقسم إلى تقليديـة وأخرى مستحدثة:

تخزين الهيدروجين الغازى تحت ضغط:

يمكن أن يخزن الهيدروجين الغازى المضغوط فى أوعية ضغط فوق سطح الأرض أو فى نظم تخزين تحت سطحها (كالأقبية أو المستودعات الأرضية ومـا إلى ذلك).

تخزين الهيدروجين تحت سطح الأرض:

سيكون لمنظومات الإمداد بالهيدروجين فى المستقبل إنشاءات تـشابه تلـك المستعملة اليوم فى نظم الإمداد بالغاز الطبيعى، حيث أثبت التخزين تحـت الأرض جدواه. فمن الممكن السيطرة على المشاكل الفنية الخاصة فيما يتعلق بالهيـدروجين النقى (المرجع: ليندبلوم – ١٩٨٥). وحتى الآن، هناك قبو للغـاز مـستعمل منـذ ١٩٧١ فى مدينة " كييل" لمدها بالغاز اللازم والذى يكون الهيدروجين حتى ٦٥% منه تحت ضغط يصل إلى ١٨٠ ضغطا جويا. وتصلح الخبرة المكتسبة من تخزين الغاز الطبيعى تحت الأرض – من حيث التكاليف – للتطبيق فى حالة الهيدروجين، إذ أن منظومات تخزين الهيدروجين التى لها نفس النوعية (التكوينات الجيولوجيـة الطبيعية وأقبية الملح التى يتم استخراجه منها كمحلول) وتحت نفس المقـدار مـن

نطاق ضغوط التشغيل، ستكون أعلى تكلفة من حالة تخزين الغاز الطبيعى بثلاث مرات، وذلك بالنظر إلى النسبة بين القيمة الحرارية الحجمية لكلا الغازين، ويمكن أن تنسب تكلفة المستودع إلى وحدة الكتل من الهيدروجين المخزن، ويتراوح رقمها بين ٢، ١٠ دولارات لكل كيلو جرام منه وذلك اعتمادا على نوعية المستودع، والظروف الجيولوجية ومستوى الأسعار... إلخ. وتناظر القيمة العليا حالة أقبية الملح التى يتم استخراجه منها كمحلول، أو الأقبية حيث عملية الاستخلاص الميكانيكى. ولتخزين الهيدروجين تحت سطح الأرض أهميته الخاصة لمنظومات التخزين الثابتة على المقياس الكبير.

منظومات تخزين الغاز المضغوط فوق سطح الأرض:

تستخدم هذه المنظومات اليوم فى تخزين الغاز عبر نطاق عريض من الأحجام والضغط، فهناك أسطوانات الغاز ذات الضغط الدارج القياسى (٥٠١ ، ٢٠٠ ضغط جوى) وهناك الحاويات الكروية ذات الضغط المنخفض (بحجم يتخطى الـ ١٥٠٠٠ م٣ وضغط من ١٢ إلى ١٦ ضغطا جويا). وهذه النطاقات تطبق أيضا فى حالة الهيدروجين. وتكاليف حاويات الغاز المضغوط موثقة جيدا نظرا لانتشار استعمالها. والرقم المرجعى الذى يحسن استخدامه هو ٥٠-٩٠ دولار أمريكى / م٣ تحت الضغط الجوى فى حالة الحاويات الصغيرة. والحاويات الثابتة المثبتة مكانها بصورة كاملة أعلى تكلفة فى الأساس (هناك قانون أسى لتناقص التكاليف مع زيادة حجم الوعاء بأس – ٠,٢٥ يؤدى استعماله لنفس التكاليف بالنسبة للحاويات الضخمة ذات الـ ١٠٠٠٠ م٣ حجما) وعموما تتراوح التكاليف النوعية (لكل وحدة كتلة من الغاز) نمطيا بين ٦٠٠، ١٠٠٠ دولار أمريكى لكل كيلو جرام من الهيدروجين، أو تصل إلى الضعف لدى مقارنتها بمنظومات تخزين الأحجام الكبيرة منه تحت الأرض. وعلى ذلك لا يكون تخزين غاز الهيدروجين تحت ضغط مجديا إلا مع منظومات التخزين المتحركة المعدة

للنقل والتوزيع، أو مع التطبيقات التى تحتاج وحدات ثابتة صغيرة. وتخزين الأحجام الكبيرة من الغاز المضغوط فوق الأرض (حينما لا يتاح التخزين تحت الأرض مثلا) غير مفضل اقتصاديا إلا فى حالة التخزين لفترات زمنية قصيرة، أى مع عدد كبير من عمليات الملء كل عام. وختاما فحاويات الغاز المضغوط غير ملائمة كخزانات وقود لسيارات الركوب بالنظر أساسا لوزنها وحجمها الكبيرين.

تخزين الهيدروجين السائل:

تتبع أحدث الصيحات فى إنتاج الهيدروجين السائل ونقله (بحرا أو بالسكك الحديدية أو على الطرق السريعة) وتخزينه. ولتخزين الهيدروجين السائل أهميته الخاصة، إذ أنه يمثل حلا طيبا من الناحيتين التقنية والاقتصادية سواء للتخزين الموسمى للأحجام الضخمة أو لصهاريج التخزين لسيارات الركوب.

وتتوافر حاويات تخزين الهيدروجين السائل من كافة الأحجام من ١٠٠ لتر وحتى ٥٠٠٠ م٣ (المرجع: إديسكوتى ووِيليا مسون – ١٩٧٩). والأخيرة عبارة عن إناء ديوار(*) ذى جدار مزدوج عازل للحرارة. والمادة العازلة غالبا ما تكون البيرلايت وأحيانا مما يطلق عليه المادة العازلة الفائقة **superinsulation** (للأحجام الصغيرة وكذلك للحاويات الضخمة جدا)، وتوضع فى الفراغ الواقع بين الجدارين الداخلى والخارجى. ويقل الفاقد بالبخر نتيجة فيض الحرارة المتبقى بصورة كبيرة جدا بازدياد حجم الوعاء، ويتراوح ما بين ٢، ٣% فى اليوم للأوعية الصغيرة، ٠,١% للحاويات كبيرة الحجم. والقيمة الأخيرة تعنى أن الفاقد نتيجة الغليان لا يمثل مشكلة بالنسبة للحاويات الضخمة. وفى حالة خزانات سيارات

(*)إناء ديوار : وعاء يستخدم لحفظ الغازات المسيلة له جدار مزدوج وفراغ بين الجدارين ويطلى وجه الجدار المواجه للفراغ بالفضة . (المترجم)

الركوب لابد من النظر بعين الاعتبار، إلى أنها تعمل تحت قدر معين من الضغط الزائد. وعلى ذلك فانبعاث الهيدروجين نتيجة غليانه لا يبدأ إلا بعد بضعة أيام من عدم الاستعمال، فى حين أنه مع بدء سير السيارة، يسحب الهيدروجين أولا من الهيدروجين الغازى بالصهريج. وتقلل هذه الحقيقة من فواقد البخر. وتوضح البيانات فيما يختص بتكاليف حاويات الهيدروجين السائل أن هناك تناقصا فى التكلفة النوعية (أى بالدولار لكل م٣) على نحو نمطى مع ازدياد سعة الوعاء (بعلاقة دالة مرفوعة للأس (-٠,٣). ويعنى ذلك تكلفة نوعية فى حدود ٣٠ دولارًا أمريكيًا لكل كيلو جرام من الهيدروجين للمستوعات الضخمة الثابتة وحتى أكثر من ٥٠٠ دولار / كج من الهيدروجين للحاويات الأصغر فى نطاق الإنتاج المعتدل. وفى جميع الأحوال تحتاج مستودعات الهيدروجين السائل الضخمة - عند التخزين فوق سطح الأرض - أقل تكلفة استثمارية.

التخزين فى الهيدريد(*) المعدنى:

لقد أجرى مقدار كبير من البحوث لأجل تطوير معدات تخزين الهيدروجين التى تعمل فى نطاق الضغوط المعتدلة والتى تتخطى سعاتها ما يمكن الوصول إليه بالتخزين البسيط للغاز المضغوط (المرجع: سودا - ١٩٨٧). وتتلخص الفكرة فى ملء وعاء ضغط بمادة مثل سبيكة معدنية مكونة للهيدريد، بحيث يمكن تحت ظروف اتزان معينة من درجة الحرارة والضغط وغير ذلك، تخزين كميات كبيرة من الهيدروجين. وفى خلال تكون الهيدريد المعدنى تنقسم جزيئات الهيدروجين وتحتبس ذرات الهيدروجين فى تشبيكة ذرية من المعادن المناسبة أو السبائك المعدنية. وللحصول على الظروف التعادلية ما بين الميزات والعيوب، يتعين أن تكون كثافة التخزين فى الهيدريد المعدنى من الكبر بحيث

(*) الهيدريد hydride : هو مركب من الهيدروجين مع عنصر أو مجموعة أكثر قاعدية أو ذات شحنات كهربية موجبة (المترجم)

تعوض السلبيات الناتجة عن وجود المادة الإضافية (السبيكة المعدنية) التى ستشغل حيزا من سعة التخزين، وعن الوزن والتكلفة الإضافيين.

وعلاوة على ذلك، فمن الأهمية بمكان – لدواعى التطبيق العملى – أن تـتم السيطرة على عمليات انتقال الحرارة سواء خلال الشحن (التبريد لتصريف حرارة الهدردة) أو خلال التفريغ (التسخين فى عملية إزالة الهدردة).

ولم تثبت صلاحية سوى القليل من هيدريدات المعادن لتخزين الهيـدروجين عمليا من بين المواد العديدة التى أجريت عليها الاختبارات، وهـى (مانيـك يـد٤ (M_gNiH_4)، (ح تىس FeT_{ix}) (حيث س = ١,٥، ٢)، تـى ز ر كـر مـن يـد س $T_iZ_rC_rM_nH_x$ وينبغى أن تكون منظومات التخزين من هيدريدات المعـادن قـادرة على منافسة منظومات التخزين التقليدية للغاز المضغوط. ومن هنا ينبغى للمرء أن يتوقع ميزات للتخزين فى هيدريدات المعادن فى واحدة على الأقل مـن النـواحى التالية: السعة التخزينية النوعية من حيث الحجم، السعة التخزينية النوعية من حيث الكتلة، والاستثمار النوعى وتكاليف التشغيل. والمطلب الأول تحققه كل الهيدريدات المعدنية مقارنة بوسائل التخزين التقليدية للغاز المضغوط، إذ أن كثافـة التخـزين الفعالة فيما يخص الحجم لذرات الهيدروجين المقيدة داخل تشبيكة المعـدن يمكـن مقارنتها بكثافة الهيدروجين السائل. أما المطلب الثانى فإنه يتحقق – فقط – بـشكل هامشى: فالسعة التخزينية بدلالة الكتلة (متضمنه وزن حاوية الضغط) تتراوح مـا بين نحو ٠,٠٢٤ كج من الهيدروجين فى الكيلو جـرام لهيدريـدات الماغنـسيوم والنيكـل فى الدرجات العالية (تصل درجة حرارة إزالة الهدردة مـا بـين ٢٥٠، ٣٥٠ °م)، إلى ٠,٠١٤ كج من الهيدروجين فى الكيلو جرام لهيدريدات الـدرجات المنخفضة مثل هيدريدات الحديد والتيتانيوم (تصل درجة إزالة الهدردة إلـى ٤٠ – ٧٠ °م).

وللمقارنة، فإن حاويات الغاز المضغوط المعتادة يمكنها أن تخزن ما بين ٠,٠٠٩ إلى ٠,٠١٣ كج من الهيدروجين لكل كيلو جرام من الوزن المحتوى. وختاما فلا يتيسر تحقيق المطلب الثالث بسبب تكاليف سبائك المعدن المهدردة، إذ أنها تكلف – نمطيا – من ٢٥ دولارًا أمريكيًا لكل كيلو جرام من المادة فى صورتها الجاهزة للاستعمال، وهو ما يعنى ١٧٠٠ دولار أمريكى على الأقل لكل كيلو جرام من الهيدروجين لهيدريدات الدرجات المنخفضة، علاوة على تكاليف إضافية للمبادل الحرارى وحاوية الضغط وغيرهما. ومن الأهمية بمكان ملاحظة ألا نتوقع انخفاضا ملموسا بتغير حجم معدة التخزين، لأن الحاوية تمتلئ بسبيكة المعدن المُخزنة.

وتبعا لذلك فإن الميزة الواضحة الوحيدة فى التخزين بهيدريدات المعادن هى صغر حجم وسيلة التخزين. وهذه المسألة، إلى جانب مسائل متعلقة بالأمان – تجعل الاستعمال المستقبلى لمنظومات هيدريدات المعدن مقصورا – فيما يبدو – على تطبيقات محددة من تخزين الهيدروجين، حين يكون الغاز المضغوط المعتاد إما أعلى كلفة أو حين لا يسمح الحيز المتاح بتطبيقه. وقد تقع هذه الحالة مع التخزين الثابت غير المتحرك فى أحجام صغيرة، أو فى منظومات التخزين المتحركة. وخزانات التخزين من الهيدريدات للمركبات التى تعمل بالهيدروجين مدمجة بشكل خاص، ومن الممكن استعمال الحرارة الخارجة من المحرك فى عملية اللاهدردة **dehydriding**. إلا أن هذا ليس كافيا – على كل حال – لاستعمال هيدريدات الدرجة العالية على إطلاقه. ولهذا السبب طرح استخدام صهاريج ثنائية بها أقسام منفصلة لدرجات الحرارة العالية والمُنخفضة وتم اختبارها بالفعل، وإن كانت الغلبة فى معظم الحالات لصهاريج الحديد والتيتانيوم البسيطة. وتكمن الصعوبة الرئيسية فى الاستخدام بمركبات الركوب فى وزن الصهريج بما يحمله من هيدريد معدنى ثقيل يؤدى إلى استهلاك أعلى فى الوقود. والزيادة المناظرة فى

تكلفة التشغيل من الخطورة بحيث يرجح أن يقتصر استعمال الصهاريج من هيدريدات المعادن على رحلات المسافات القصيرة (١٥٠ – ١٨٠ كيلو مترا). ويتشابه ذلك مع حالة المركبات الكهربية التى يقتصر استعمالها على نفس النطاق بسبب ثقل البطارية أساسا.

تكاليف تخزين الهيدروجين:

رغم سهولة التنبؤ بتكاليف تخزين الهيدروجين، فإن هناك عددا من النقاط الخاصة بكل وسيلة تخزين، يتعين أخذها فى الاعتبار لتوضيح مزايا وعيوب الطرق الممكنة المختلفة لذلك. وبصفة عامة فإن الهيدروجين المودع للتخزين يكون فى صورة إما غازية أو سائلة، اعتمادا على أسلوب التخزين. وتمثل كلفة الهيدروجين عند هذه النقطة (أى لدى تفريغه فى المستودع)، إلى جانب التكلفة المرتبطة بالسعة التخزينية، عنصرى التكلفة الرئيسيين اللذين يمكناننا من تقدير التكاليف لموازنتها بتكاليف الأساليب الأخرى. على أية حال – وفى كثير من التطبيقات المهمة وفقا لنوع التخزين إما أن يعالج الهيدروجين قبل تخزينه، أو تعالج وحدة التخزين نفسها إبان وقت التخزين بكيفية تضيف أعباءً إضافية تعتمد على الطريقة المتبعة فى تخزين الهيدروجين:

١) فى حالة منظومات التخزين الضخمة غير المتحركة، وعند نهاية خط إنتاج النصيب الأكبر من الهيدروجين، أو نهاية خط مواسير طويل، ينبغى معالجة الغاز ذى الضغط المنخفض قبل تخزينه، أى كبسه حتى مستويات عالية من الانضغاط أو تسييله فى المكان فى حالة تخزين الهيدروجين سائلا. وتتوقف تكاليف عملية المعالجة هذه على القدرة اللازمة للكبس، وتدخل ضمن عناصر التكاليف الرأسمالية وتكاليف التشغيل لعملية التخزين.

٢) فى حالة منظومات التخزين المتحركة لأغراض النقل والتوزيع، لابد أن تنقل وحدة التخزين ذاتها إلى موضع الاستهلاك. ولـــنفس وزن حاويـــة التخزين تعتمد تكاليف التشغيل على النسبة الوزنية للهيدروجين، والتـــى قد تختلف كثيرا من طريقة تخزين لأخرى. وعلى ذلك، فبالإضافة إلـــى التكلفة النوعية للحاوية، تمثل سعة التخزين بدلالة الـــوزن عـــاملا لـــه أهميته فى مقارنة أساليب التخزين المتنوعة لهذا النوع من الاستهلاك.

٣) ويتشابه ذلك مع حالة مستودعات الوقود الخاصة بالمركبات. وعلى أيـــة حال فهناك فرقان: الأول هو أن خزان الوقود، ذو سعة صغيرة نـــسبيا، إذ أن الهيدروجين ينقل باعتباره وقودا (لا سلعة تجارية)، وبالتـــالى لا تكون لتكاليف الحاوية النوعية نفس الأهمية. وعلى الصعيد الآخر، يمثل وزن خزان الهيدروجين إضافة إلى وزن السيارة، فيرفع من الاستهلاك النوعى للوقود. وتتوقف الجدوى الاقتصادية لكل أسلوب مـــن أســـاليب تخزين الهيدروجين فى هذه الحالة، ليس فقط على سعة التخزين معبـــرا عنها بالوزن، بل وأيضا على نطاق المسافات المختار للسيارة (المسافة بالميل التى تقطعها لكل امتلاء كامل من خزانها).

لكل هذه المؤشرات الخاصة سيتم تحليل هذه الحالات بتفصيل أوسع. وفـــى المناقشة التالية لابد من معرفة البيانـــات النوعيـــة (تكلفـــة المـــستودع النوعيـــة، الاستثمارات النوعية لكل وحدة قوى محركة،استهلاك الطاقة النوعى... إلخ.)

جدول (١٤-١)

القيم النمطية لتقييم تكلفة التخزين ومقارنة بين

بدائل تخزين الهيدروجين المختلفة

الطريقة	تكلفة المستودع النوعية (ع) دولار/كجم من الهيدروجين	التكاليف النوعية منسوبة لمقدار القدرة المحركة (ق) دولار /كجم من الهيدروجين	التكلفة النوعية للطاقة (ط) دولار/ كجم من الهيدروجين
أ - منظومات التخزين الضخمة: (تشمل التكلفة الإقامة والمعدات المساعدة)			
- التخزين تحت سطح الأرض	حوالى ١٠	حوالى ٢٥٠٠	حوالى ٠,٠٧
- تخزين فوق الأرض كغاز مضغوط	١٠٠٠ - ٢٠٠٠	حوالى ٢٥٠٠	حوالى ٠,٠٧
- التخزين فى هيدريدات معدنية	٢٠٠٠ - ٢٥٠٠	حوالى ٢٥٠٠	حوالى ٠,٠٧
- تخزين الهيدروجين المسال	٥٠ - ٢٠٠	حوالى ٣٠٠٠٠	حوالى ١,٤٠

تابع جدول (١٤-١)

الطريقة	تكلفة المستودع النوعية دولار/ كجم من الهيدروجين	بيانات أخرى ذات دلالة عن تكاليف المنظومة (مقادير نسبية)		
		تكلفة الوحدة من الهيدروجين لدى مدخل وحدة التخزين	سعة التخزين لكل وحدة من وزن المستودع	سعة التخزين لكل وحدة من حجم المتسودع
ب – منظومات التخزين الصغيرة: بافتراض إنتاج متسلسل ذى حجم متوسط (تشمل التكلفة المعدات المساعدة)				
- أسطوانات الغاز	١٠٠٠-١٢٠٠	١	١	١
- التخزين فى هيدريدات معدنية (وحدات ثابتة بما فى ذلك تكلفة المبادل الحرارى)	١٨٠٠-٢٠٠٠	حوالى ١	حوالى١,٤	< ٤
-خزان من هيدريدات معدنية للمركبات (خزان ثنائى مزدوج)	١٧٠٠-١٩٠٠	حوالى ١	حوالى٢	حوالى ٤
- هيدروجين سائل	١٠٠٠-١٧٠٠	١,٤ – ٢	< ١٤	حوالى ٤

منظومة تخزين الهيدروجين الضخمة غير المتحركة:

مثل كل منظومة طاقة تمثل نسبة الاستغلال الزمنى (مقدرة بعدد الساعات فى السنة) عاملا ذا صلة وثيقة بتقدير التكلفة. وفى منظومات التخزين يقاس الاستغلال ($غ = \frac{س}{ع}$) بزمن الاستعمال الفعلى من ناحية التفريغ بالمنظومة. وبالإضافة لذلك فمن الضرورى فى منظومات التخزين من إدخال عامل ثان للربط ما بين سعة تخزين الطاقة وعامل قياس الاستغلال السابق تعريفه (المرجع: كاربيتيس – ١٩٨٥).

ويعبر عن هذا المعامل الثانى بالنسبة $\frac{ع_غ}{ع_س}$، حيث تشير $ع_غ$ إلى السعة التخزينية للمستودع (بالكيلو جرام من الهيدروجين مثلا)، وتشير $ع_س$ إلى الإنتاج السنوى (كيلو جرام هيدروجين فى السنة) والمقدار ز المساوى غ. $\frac{ع_غ}{ع_س}$ يمثل وقت تفريغ المستودع بكامله (عند معدلات التفريغ المعتادة). وعلى ذلك فيمكن استعمال النسبة

$\frac{ز}{غ}$ كبديل للنسبة $\frac{ع_غ}{ع_س}$

وعلى ذلك تأخذ معادلة تكلفة التخزين للمنظومة ككل الصورة:

$$ك = د \left[\frac{ق}{غ} + \frac{ز}{غ} ر \right] + ج$$

حيث ك هى تكلفة التخزين لكل وحدة من الهيدروجين المخزن (دولار لكل كيلو جرام من الهيدروجين، ق هى التكلفة الرأسمالية النوعية المتعلقة بعنصر القدرة (دولار لكل كيلو جرام من الهيدروجين فى الساعة)، بينما تشير ر إلى التكاليف الرأسمالية النوعية للمستودع (دولار لكل كيلو جرام من الهيدروجين)، ج إلى التكلفة النوعية لعملية المعالجة (دولار لكل كيلو جرام من الهيدروجين)، أما د فترمز إلى الدفعة السنوية، والمقدرة ب ١٥%. وتستخلص بعض النتائج من

تكاليف التخزين بالفحص البسيط للقيم الواردة بالجدول (١٤-١). فعلى سبيل المثال بمقدورنا أن نستنتج أن التخزين تحت الأرض هو الأقل تكلفة على الإطلاق بين كل طرق تخزين الهيدروجين على المستوى الضخم. على أية حال، تبرز أهمية نقطة التعادل فى ضوء العوامل الداخلة فى دالة التكلفة. فمثلا يسود الرأى عامة بأن تكلفة تخزين الهيدروجين السائل تمنع استعمال أسلوبه فى تطبيقات التخزين المعتادة. وليس ذلك بالصحيح وخاصة فى حالة التخزين على نطاق ضخم. وباستخدام أرقام جدول (١٤-١) للمقارنة بطرق التخزين فوق الأرض الأخرى، يتبين انخفاض تكاليف تخزين الهيدروجين السائل إذا كانت $\frac{\text{ز}}{\text{غ}} = \frac{\text{ع}_{\text{غ}}}{\text{ع}_{\text{س}}}$ أكبر من ٠,٠٣ ولدى التخزين لمدد طويلة تؤثر سعة التخزين $\text{ع}_{\text{غ}}$ تأثيرا ذا بال على دورة رأس المال السنوية $\text{ع}_{\text{س}}$. ومن ثم فالنسبة عامة ما تزيد عن ٠,٠٣ (فى الحالة الحدية، عند التخزين الموسمى ومع دورة شحن وتفريغ واحدة فى العام تساوى النسبة $\frac{\text{ع}_{\text{غ}}}{\text{ع}_{\text{س}}}$ الواحد الصحيح). وعلى الجانب الآخر ومع مدد تخزين بالغة القصر (دورات تخزين يومية على سبيل المثال) تصل النسبة $\frac{\text{ع}_{\text{غ}}}{\text{ع}_{\text{س}}}$ إلى $\frac{١}{٣٦٥}$، ويغدو تخزين الهيدروجين السائل باهظ التكاليف، وعلى ذلك يصبح تخزين الغاز مضغوطا فوق سطح الأرض البديل المحبذ من وجهة النظر الاقتصادية فى هذه الحالة (إذا لم تتوفر المستودعات تحت الأرض). وهذا الموقف بطبيعة الحال مترتب على حقيقة أن تكلفة المستودع النوعية فى حالة تخزين الهيدروجين سائلا، (وهى عنصر التكلفة الاستثمارية المرتبط بسعة التخزين)، منخفضة نسبيا، إلا أن المصاريف المرتبطة بمقدار القدرة المحركة عالية. ومن ثم فلا يوصى ببديل تخزين الهيدروجين السائل فى حالة دورات التخزين القصيرة، حيث سعة التخزين اللازمة صغيرة (مع نسب منخفضة من $\frac{\text{ع}_{\text{غ}}}{\text{ع}_{\text{س}}}$، أى عدد كبير من دورات الشحن والتفريغ).

منظومة تخزين الهيدروجين غير المتحركة (على المقياس الصغير):

يخزن الهيدروجين عادة فى هذه الحالة دون معالجة، لذا فإن تكاليف التخزين تتوقف بصفة أساسية على الاستثمارات فى المستودع وتكلفة الهيدروجين عند المدخل فقط (انظر جدول رقم ١٤ – ١). ويتوقع أن تكون تكلفة التوريد لدى موقع الشحن للهيدروجين السائل أعلى بمقدار ١,٤ مرة مقارنة بتكلفة الهيدروجين الغازى.

وتبعًا لذلك يتميز تخزين الهيدروجين السائل مع المقادير الصغيرة (فى المحطات الصناعية مثلا) فقط إذا كان المتوقع أن يستعمل الهيدروجين فيما بعد فى صورته السائلة، أو إذا كانت تكلفة النقل العالية للهيدروجين الغازى إلى المحطة ستعوض تكاليف الإسالة.

منظومة التخزين المتحركة لأغراض النقل والتوزيع:

تمت تجربة نقل الهيدروجين السائل بالمراكب إلى حد ما بالولايات المتحدة، ويمكن تدبر نقله بحرا باستخدام سفن نقل السوائل كما فى حالة الغاز الطبيعى المسال، ورغم أن تكاليف نقل الهيدروجين المسال قد تزيد عن تكلفة نقل الغاز الطبيعى السائل بالسفن بمقدار ٣,٥ إلى ٤ أضعاف (بسبب محتوى الطاقة الحجمى، والحاجة إلى عزل أكثر للمستودع وغير ذلك) فإنه سيكون وسيلة ذات جدوى اقتصادية عند النقل بالبحر لمسافات طويلة، وسيصبح أكثر فاعلية بصفة خاصة إذا ما اقترن بتخزين الهيدروجين السائل عند نقطة الاستهلاك (النهاية).

وفيما يختص بالنقل بالسكك الحديدية، وعلى الطرق البرية فيشيع حاليًا استعمال أسطوانات الغاز المضغوط، وإن عابه عدم جدواه من الناحية الاقتصادية، فليس بوسع شاحنة سعتها ٢٥ طنًا (مثلا) أن تنقل أكثر من ٢٧٠ كيلو جرامًا من الهيدروجين، والتكلفة المناظرة لنقل الهيدروجين السائل بالسكك الحديدية أو على

الطرق أقل بكثير (ويزداد الفرق مع المسافات الطويلة) رغم التكلفة الأعلى لمركبات نقل الهيدروجين السائل، ويرجع ذلك إلى كثافة النقل الأعلى نتيجة ارتفاع السعة النوعية (منسوبة للوزن بالنسبة لمستودعات الهيدروجين السائل) (انظر الجدول رقم ١٤ – ١)، وفى بعض الحالات يمكن أن يعوض ارتفاع كثافة النقل حتى تكاليف الإسالة، والتسليمات لكبار مستهلكى الهيدروجين الغازى فى الولايات المتحدة وكندا غالبًا ما تتم بمركبات بأوعية هيدروجين سائل، يضخ عند الموقع إلى مستويات أعلى من الضغط، ثم يبخر ويغذى داخل الموقع المستهلك فى صورة غاز ذى ضغط عال، وترتكز اقتصاديات هذا الأسلوب على حقيقة أن مقطورة مفردة بخزان يمكنها تسليم نفس الكمية من الهيدروجين الغازى التى تحملها – نمطيًا – ١٥ إلى ٢٠ شاحنة من الأسطوانات المضغوطة.

مستودعات الوقود المتحركة:

لا يرجح مستقبلاً تشغيل المركبات بالهيدروجين إلا من خلال بديلين للتخزين هما منظومات التخزين بهيدريدات المعادن أو خزانات الهيدروجين السائل، ومنظومات تخزين الغاز تحت ضغط عال ذات التقنية المتقدمة تقف على قدم المساواة – من حيث الوزن – مع خزانات هيدريدات المعادن، وإن كانت تحتاج حيزًا أكبر (انظر بجدول ١٤ – ١ السعات التخزينية منسوبة للوزن والحجم)، كما أن مشاكل الأمان بالنسبة للمركبات أكثر خطورة.

وقد تأكدت صلاحية كل من هيدريدات المعادن، والهيدروجين المسال عمليا فى المركبات (المرجع: بيشكا ١٩٨٧، ديلوتشى ١٩٨٩) وتبدو خزانات هيدريدات المعادن للوهلة الأولى البديل المفضل، حيث أنها تشحن بهيدروجين غازى (تكاليف وقود أقل فى محطة الملء) ولا تعانى من الفواقد عن طريق الغليان التى تعانى منها خزانات الهيدروجين السائل عند عدم الاستعمال لفترات مديدة، وعلى أية حال فهناك العديد من الجوانب الأخرى مما ينبغى أخذه فى الحسبان، وأهمها تأثير

الوزن الهائل للخزان على أداء المركبة وعلى تكاليف التشغيل، وبالنسبة لهيدريدات المعادن لا تتجاوز سعة التخزين الفعالة (شاملة وزن حاوية التخزين تحت ضغط ٥٠ جوى) مقدار ٠,٠١٨ كجم من وقود الهيدروجين لكل كيلو جرام من وزن الخزان الكلى، حتى مع الخزانات المشتركة، ويتضح عيب هذا الاحتياج لخزان هائل الوزن عند تقدير كفاءة الطاقة الشاملة للمركبة، وهو ما يكافئ تكلفة وقود التشغيل، وتبين المراجع (كاربيتس ١٩٨٢، ١٩٨٨) أن كفاءة الطاقة لمركبة ما تقدر بالصيغة:

$$\text{ع} = \text{ع}_{\text{و}}\ \text{ع}_{\text{م}}\ \text{ع}_{\text{ن}} \left(1 - \frac{\text{ن}_{\text{م}}\ \text{ر}}{\text{ن}_{\text{و}}\ \text{ع}_{\text{م}}}\right)$$

حيث ع هى النسبة بين الشغل المستفاد خلال دورة قيادة قياسية وكمية الطاقة الأولية المستخدمة فى إنتاج الوقود المستهلك فى إكمال هذه الدورة، $\text{ع}_{\text{و}}$ هى كفاءة الطاقة الكلية لإنتاج الوقود، والنقل والتوزيع وعملية التزويد بالوقود، $\text{ع}_{\text{م}}$ ترمز إلى الكفاءة الميكانيكية الفعلية لمنظومة قيادة المركبة (من المحرك وحتى الإطارات)، و $\text{ع}_{\text{ن}}$ هى النسبة بين الحمل ووزن المركبة الكلى، $\text{ن}_{\text{م}}$ هى الطاقة الميكانيكية النوعية اللازمة لدورة القيادة القياسية (بالكيلو وات ساعة لكل كجم. كيلو متر)، ر هو نطاق حركة المركبة ابتداءً من تمام امتلاء الخزان (بالكيلو متر)، $\text{ن}_{\text{و}}$ تمثل الكتلة المرتبطة بمحتوى الطاقة النوعى فى الوقود (كيلو وات ساعة لكل كيلو جرام من وزن الخزان).

وحيث إن القيمة الحرارية الدنيا للهيدروجين تبلغ حوالى ٣٣,٣ كيلو وات ساعة لكل كيلو جرام منه فإن قيمة $\text{ن}_{\text{و}}$ = ٠,٥ كيلو وات / كجم فى حالة التخزين فى هيدريدات (حيث هناك ٠,٠١٥ كيلو جرام من الهيدروجين لكل كيلو جرام) وفى حالة الهيدروجين السائل تزيد القيمة المناظرة لأكثر من سبعة أضعاف ونصف ضعف.

ومن الواضح أن أقصى كفاءة شاملة للمركبة – وطبقا للتعريف أعلاه تعنى الحد الأدنى من استهلاك الوقود وبالتبعية الحد الأدنى من نفقات التـشغيل، إذا مـا قارنا الوقود المنتج من نفس مصدر الطاقة الأولى.

وتتبع من العلاقة المذكورة سابقًا نتيجة طريفة بخصوص كفـاءة المركبـة، وهى أنه باستعمال خزانات طاقة ذات كتلة نوعية أقل، لا تمثل المسافة التى تقطعها المركبة عاملا مستقلا فى التصميم، حيث إن الكفاءة تتناقص بسرعة مع ازدياد هذه المسافة، والحد النظرى حيث تقارب الكفاءة الصفر (أو تقـارب التكلفـة النوعيـة اللانهاية) ووفقا للعلاقة المذكورة آنفًا هو ر = $ن_و$ $ع_م$ ÷ $ن_م$

وتصل قيمة $ن_م$ لأغلب دورات القيادة المعيارية إلى زهاء ١,٤ × $١٠^{-٤}$.

ولمركبة تسير بالهيدروجين قيمة $ن_و$ لها = ٠,٥ (كيلو وات ساعة من طاقة الوقود لكل كيلو جرام من وزن الخزان)، وآلة احتراق داخلى لهـا كفـاءة $ع_م$ = ٠,١٨، تصل قيمة ر إلى نحو ٦٥٠ كيلو مترًا، أو لمركبة بالكهربـاء ذات تقنيـة متقدمة فى تخزين البطارية تكون القيم المناظرة هى $ن_و$ = ٠,٠٤، $ع_م$ = ٠,٦، ر = ٢١٥ كيلو مترًا (للبطاريات المستقبلية (ص كب) حيث $ن_و$ = ٠,١ تكـون ر = ٤٣٠ كيلو مترًا) وهذه القيم بطبيعة الحال تمثل الحد الأقصى النظـرى، أمـا فـى التصميمات العملية بوزن خزان واقتصاديات وقود مقبولين، فقد تأكد أن قيمة المدى ر تبلغ ٥٠% من هذه القيم النظرية.

وهناك حقيقة أخرى لها طرافتها، وهى أنه عندما نقارن تخـزين الهيدريـد المعدنى والهيدروجين السائل فى المركبات التى تعمل بالهيدروجين نجد أن اعتماد الكفاءة على العناصر سالفة الذكر تؤدى إلى ظروف تعادليـة واضـحة وقاطعـة، وسنفترض لهذه المقارنة نفس قيمة $ن_م$ (نفس دورة القيادة المعيارية) كما سبق، $ع_م$ للمركبات الاعتيادية ذات آلات الاحتراق الداخلى، وعلاوة على ذلك سنفترض نفس

المعامل ع ن لكلا المركبتين موضوع المقارنة. ستعتمد الظروف التعادلية على المقادير ع و، ن و، ر.

ففى حالة التخزين كسائل تكون ع و أقل من نظيرتها فى حالة الهيدريد المعدنى بمعامل قدره ١,٤٥ بسبب تكلفة الإسالة والفاقد فى أثناء النقل، وعلى الجانب الآخر يكون محتوى الطاقة النوعى منسوبًا للوزن نو فى حالة تخزين الهيدروجين المسال، أكبر من نظيره فى حالة الهيدريد المعدنى حيث نو = ٠,٥ بمقدار سبع مرات ونصف، وبإدخال هذه العلاقات فى معادلة كفاءة الطاقة للمركبة نجد أن:

ع فى حالة الهيدروجين المسال أعلى من ع فى حالة الهيدريد المعدنى إذا كانت ر تزيد على المقدار ٢٢٠ كيلو متر، ويعنى هذا ببساطة أنه إذا كان اختيار سعة خزان الوقود يتم لمسافة تزيد عن ٢٢٠ كيلو مترًا، فإن الإنفاق الكلى على بند الطاقة (وتكاليف التشغيل بالنسبة للوقود) ستكون أقل فى حالة الهيدروجين المسال (رغم نفقات الإسالة وتكلفة الوقود العالية لدى محطة التموين به).

الباب الخامس عشر

محطات القوى الكهرومائية متناهية الصغر

مقدمة توليد القدرة:

مع قدم تقنية توليد القدرة هيدروليكيا فإنها ستبرز كمصدر استراتيجى لإنتاج الكهرباء فى العقود المستقبلية، وبصفة خاصة فى الدول النامية، حيث يتواجد أغلب مخزون العالم من هذه الإمكانات غير المستغلة. وعلى الرغم من ضخامة المخزون العالمى من القدرة الهيدروليكية، فإن العديد من العوامل تحد من إمكان استغلالها. ومع ذلك يكتنف الكثير من عدم التيقن التقديرات الراهنة لهذا المخزون. وهناك عدد من التقنيات الحاكمة فى سبيل الحد من الطبيعه المتقلبة لانسياب مياه الأنهار، أسهمت فى الاستغلال الناجح لمصادر الطاقة الهيدرولوجية سواء على المقياس الصغير أو الكبير، مثل التخزين بالضخ، وإعادة تأهيل المصانع العتيقة والإجراءات التعويضية. وعلى الرغم من التقدم التكنولوجى، فإن المناقشات تدور حول أن الآثار الاجتماعية والبيئية هى ما يحد – أساسا – ويمثل مصدر عدم التأكد الذى يوثر فى تطور القدرة الهيدروليكية. والكهرباء المولدة بالقوى المائية والتى تعتمد – فى خاتمة المطاف – على بخر المياه الطبيعى بفعل الطاقة الشمسية، هى مصدر الطاقة المتجددة الوحيد الذى يستعمل على نطاق واسع اليوم فى توليد الكهرباء. ففى عام ١٩٨٦ أسهمت بنسبة ١٤,٥ % من الكهرباء المولدة على مستوى العالم. وفى سبيل تسخير الطاقة المائية نجد للمصادر المائية سواء الصغيرة أو متناهية الصغر، أهميتها وضرورة تطويرها.

على أية حال، يتم التحقق الآن من العواقب البيئية والاجتماعية العديدة المترتبة على المشروعات المائية الضخمة، والتى تشمل ضمن ما تشمل تشييد السدود الضخمة. وتتمثل هذه العواقب فى غمر الغابات والأراضى الزراعية، ومن

ثم فقدانها، والحاجة إلى إعادة تسكين الناس ممن كانوا يعيشون في المناطق المغمورة بالماء واحتمالات تفاقم الخواص الزلزالية seismicity، نتيجة لأحجام المياه المحتبسة الهائلة، والتأثيرات المحتملة على الثروة السمكية وتراكم الغرين. ولهذه الأسباب هناك اتجاه نحو تحبيذ المشروعات الهيدروليكية الصغيرة.

تحويل الشغل الميكانيكي إلى كهرباء

تتولد القدرة الكهربية في محطة القوى الكهرومائية، حينما يطلق الماء المخزن خلف سد ما، ليدير عنفات (توربينات) متصلة بمولدات. وتنقل الكهرباء إلى الأسواق وفي النهاية إلى المستهلكين النهائيين.

وللسدود التي تبنى معترضة سبيل تيارات المياه هدفان: أحدهما هو رفع منسوب المياه، ومن ثم زيادة طاقة وضعها، أو الساقط الهيدروليكي hydraulic head، والهدف الثاني هو إيجاد احتياطي مائي لتعويض التقلبات في معدل سريان النهر أو في مستويات الطلب على القدرة. وتختلف درجة أهمية كل من هذين الغرضين من موقع لآخر، فبعض السدود ليس لها – عمليا – أية طاقة استيعابية احتياطية.

وتحول التوربينات الهيدروليكية الطاقة من الماء ذي المنسوب المرتفع، أو من تيار مائي متدفق إلى طاقة ميكانيكية تدير عمودا دوارا. وفي حين تستعمل سواقي المياه من الطراز العتيق تأثير ثقل الماء مباشرة، تعمل التوربينات الهيدروليكية الحديثة وفقا لمبدأ القوة الدافعة impulse، أو مبدأ رد الفعل الذي يحول الضغط وطاقة الحركة إلى طاقة حركية دورانية.

ويحرك عمود التوربين الدوار، مولدا كهربائيا يحول القدرة الميكانيكية إلى قدرة كهربائية. وهناك ثلاثة أنواع متاحة للمولدات للاستعمال في محطات القوى

المائية. فللمحطات ذات قدرة مـركبة منخفضة هناك مولد الحث ذو تيـار متـردد أو تيار ثابت، وللقدرات المركبة الأعلـى يـستعمل النـوع التقليـدى (المتـزامن synchronous). وتتكون مفردات نقل القدرة من محطة قوى ثـانوية لرفع الجهـد أو إرساله إلى المحطات المولدة للكهرباء، ثم محطة ثانوية فرعية لخفض الجهـد أو الاستلام لدى طرف الاستهلاك التجارى، وخطـوط النقـل الواصـلة بينهمـا، ومجموعة المفاتيح الكهربية الوسيطة – فى بعض الحالات.

إمكانيات وآفاق استخدام محطات القوى الكهرومائية

تمد محطات القوى الكهرومائية العالم فى الوقت الراهن بنـسبة ٢٣% مـن احتياجاته من الكهرباء. وتقدر المصادر الكهرومائية على مستوى العالم – والتـى تعد فى حكم المجدية اقتصاديا وفنيا تحت الظروف الراهنـة بزهـاء ٢,٤ مليـون ميجاوات (كقدرة لا يتيسر تركيبها). ولو أن ألطاقات الممكنة طبقا للتقـديرات قـد جرى استغلالها بصورة كاملة، لأسهمت القدرة المائية بنحو ٣٧,٣ إنـاجول مـن الطاقة سنويا، بافتراض معدل استغلال للطاقة المركبة قدره ٥٠%. ويتواجد القـسم الأكبر من الإمكانات الكهرومائية غير المستغلة فى العالم النامى، إذ أن المنـاطق المتقدمة قد استغلت بالفعل نصيبا كبيرا من مواقعها الهيدروليكية المواتيـة لـذلك. وتحصل كثير من الدول علـى غالبيـة احتياجاتهـا الكهربيـة مـن المـصادر الهيدروليكية، فقد طورت الدول والمناطق التى تتمتع بمصادر هيدروليكية وفيـرة عموما وسائلها لتغطية الاحتياجات للكهرباء وكما هو مبين بجدول (١٥-١):

جدول (١٥-١)

قائمة مختارة للدول التى تحصل على أغلب الطاقة الكهربية من المصادر المائية

الدولة	نصيب القدرة الكهربائية من المصادر المائية %
غانا	٩٩
النرويج	٩٩
زامبيا	٩٩
موزمبيق	٩٦
زائير	٩٥
البرازيل	٨٧
البرتغال	٨٧
نيوزيلندا	٧٥
نيبال	٧٤
سويسرا	٧٤
النمسا	٦٧
كندا	٦٧

المصدر: دانييل دويدنى: " أنهار الطاقة، إمكانيات القدرة المائية " بحث **world watch** رقم ٤٤، ص ١٠، عام ١٩٨١

محطات القوى المائية الصغيرة

لم يتم بعد التوصل إلى إجماع ما حول تعريف مصطلح المحطات الصغيرة، والصغيرة جدا، ومتناهية الصغر. ففى الولايات المتحدة توصف محطات القوى المائية الميكرونية (متناهية الصغر) بتلك ذات القدرات الأقل من ١٠٠ كيلووات، ومحطات القوى المائية الصغيرة جدًا بتلك التى تتراوح قدراتها ما بين ١٠٠، ١٠٠٠ كيلووات، ومحطات القوى المائية الصغيرة هى ذات القدرات ما بين ١، ٣٠ ميجاوات، ويبين الجدول (١٥-٢) التعريف المتبع لمفهوم محطات القوى المائية الصغيرة وشديدة الصغر ومتناهية الصغر للبلدان المختلفة ووفقا لما هو بالمراجع:

البلد	نطاقات القدرة		
	متناهية الصغر (كيلووات)	شديدة الصغر (كيلووات)	الصغيرة (ميجاوات)
الولايات المتحدة	< ١٠٠	١٠٠ – ١٠٠٠	١ – ٣٠
الصين	–	< ٥٠٠	–
الاتحاد السوفيتى (سابقا)	< ١٠٠	–	٠,١ – ٣٠
فرنسا	٥–٥٠٠٠	–	–
الهند	< ١٠٠	١٠١ – ١٠٠٠	١ – ١٥
البرازيل	< ١٠٠	١٠٠ – ١٠٠٠	١ – ٣٠
بلاد أخرى	< ١٠٠	< ١٠٠٠	< ١٠

وقد قدمت هيئات دولية عديدة معونات فنية ومالية لتشييد محطات القوى المائية الصغيرة فى البلاد النامية، فقد عمل "المركز السويسرى للتقنيات القويمة" – على سبيل المثال – فى نيبال. وعاونت "الوكالة الألمانية للتعاون التقنى" الباكستان والفلبين، كما ساعدت "الوكالة النرويجية للتنمية الدولية" فى إقامة محطتى قوى مائية من النطاق شديد الصغر فى موزمبيق. ويأخذ كل من هذه المشروعات فى اعتباره المردود الاقتصادى، والقبول الاجتماعى وإدارة وتشغيل المحطة فى سياق العادات المحلية السائدة.

ولمحطات القوى المائية الصغيرة عيب وحيد، فهى غالبا ماتحصل على طاقتها من الأنهار الجارية، وتفتقر إلى المستودعات ذات السعة الكافية لتخزين المياه، وبالتبعية فقد تحدث تغيرات موسمية ضخمة فى منتوجها من الطاقة وفقا لطبيعة الموقع الهيدرولوجية، وتعتمد صلاحية محطات التوليد المائية الصغيرة للاستعمال على المدى الطويل، على الكهرباء البديلة لها، والتى تنتج إما محليا أو تستمد من الشبكة العمومية

تصميم المحطات الكهرومائية متناهية الصغر (الميكرونية)

حظيت تصميمات المحطات الكهرومائية متناهية الصغر على قسط عظيم من الاهتمام من عدة جوانب: أولا باعتبارها مصدرا ذا حجم مناسب وقابلا للاستعمال للطاقة المتجددة ، وثانيا لكونها أسلوبا معتدل التكلفة الاستثمارية للإمداد بالكهرباء فى المناطق التى تعانى من نقص التنمية. والكهرباء هى أكثر صور الطاقة إراحة... حيث تستغل فى الإنارة والتدفئة والتطبيقات الصناعية. واستخدام الكهرباء فى مثل هذه النواحى لا ينطوى على تلويث للبيئة، ومن ثم فيمكن أن يلعب دورا ذا أهمية فى الحفاظ على البيئة وتأمين سلامتها. وبالإمكان كهربة

المناطق ذات التضاريس الوعرة بمد خطوط الشبكة إلى المناطق الداخلية، أو بتوليد الكهرباء من بعض المصادر المحلية كالمواد الحيوية والإشعاع الشمسى والرياح أو الجداول المائية الجارية. والجداول الجارية على مدار السنة التى تنساب عبر منحدرات مناطق التلال شديدة الانحدار هى أحد أكثر المواقع المحلية ملاءمة للحصول على الطاقة. ولهذا السبب فإن احتياجات مناطق التلال من الطاقة بطبيعتها لا مركزية ومتقطعة غير متواصلة. وبالتالى فليس بالضرورة أن يكون توليد الطاقة مركزيا ومنظومات نقلها الأساس فى مد مزايا الكهرباء إلى المناطق الريفية النائية. وتقع أغلبية القرى فى مناطق التلال على مقربة من الجداول الجارية على مدار السنة، ومن ثم فبمقدور المنظومات الكهرومائية الميكرونية أن تلبى احتياجات الطاقة فى معظم المناطق ذات التلال الوعرة، وهو ما يساعد فى الحفاظ على ثروة الغابات المحلية التى جرد منها إقليم الهيمالايا على نحو عشوائى شنيع.

يقع عدد كبير من القرى بمناطق التلال قرب مجار مائية ذات إمكانية لتوليد الطاقة الكهرومائية على المقياس الميكرونى (متناهى الصغر) ، ومن هنا فيمكن كهربة العديد من القرى التى لم تدخلها الكهرباء من خلال خطط بتشييد محطات كهرومائية ميكرونية. ويخطط لهذه المحطات الميكرونية كى تولد مقادير محدودة من القوى المحركة. وتخضع تكلفة المحطة الكهرومائية متناهية الصغر لاعتبارات الموقع، وتعتمد بنسبة كبيرة على السعة المركبة، وكمية التدفق (التصرف) والساقط الهيدروليكى المتاح وطبوغرافية المنطقة والمسافة إلى مواقع الاستهلاك من محطة القوى ومعامل الحمل **load factor**، إلخ.

وتكلفة توليد الكهرباء من المحطات الكهرومائية الميكرونية هى الأقل على وجه الإطلاق بين كل برامج الطاقة المتجددة الأخرى التى جرى تنفيذها على مقياس صغير، مثل الغاز الحيوى، والخلايا الكهروضوئية والمولدات عن طريق

الريح. ويمكن استخدام الكهرباء المولدة فى المحطات الكهرومائيــة الميكرونيــة لأغراض الإنارة والتسخين وتوفير مياه الشــرب والرى والصناعات الكوخيــة(*) وما إلى ذلك، ومن هنا فإن لها تأثيرات اجتماعية واقتصادية بعيدة المــدى علــى أسلوب معيشة السكان المحليين.

مفهوم المحطات الكهرومائية الميكرونية وإمكانيات إقامتها فى الهند:

تتسم المناطق الشمالية والشمالية الشرقية من الهند بطبيعتها الجبلية وكثــرة التلال بها، إلى جانب تناثر التجمعات السكنية. ويتعذر الوصول لهذه المناطق، كما أن تكاليف مد خطوط شبكة الكهرباء العمومية إليها من السهول عسير ومكلف، كما أن إقامة محطات ديزل فى مثل هذه المناطق غير اقتصادى لارتفاع تكلفة النقــل. بيد أن بهذه المناطق كثيرا من الجداول الجارية بين التلال التى يمكن استغلالها فى توليد الكهرباء من خلال المحطات الكهرومائية الميكرونية، ويمكن توزيع الطاقــة للقرى المحيطة عن طريق شبكات منفصلة.

ومن شأن تطوير شبكة رى واسعة عبر البلاد أن يمثــل مــصدرا ضــخما للمحطات المائية الصغيرة. ففى قنوات الرى يصل الساقط إلى ٢ م وربمــا أكثــر، وهو ما يمكن استغلاله لتوليد القوى. وبسبب انخفاض الساقط ترتفع مقادير التــدفق (التصرف) وتميل تكاليف الإنشاءات المدنية إلى الارتفاع مما ينعكس على ارتفــاع تكلفة المشروعات. وتقدر إمكانيات القدرة الكهرومائيــة الممكــن توليــدها طبقــا

(*) الصناعات الكوخية **Cottage industries**: مصطلح يطلق على الصناعات التى يؤديها العمــال وهــم بمنازلهم كالغزل والنسيج والتطريز، والتى انتشرت على نطاق واسع قبل الثورة الصناعية (المترجم)

للخطتين المتوسطة والطويلة بالهند بحوالى ٩٠٠٠٠ ميجاوات وبمعامل حمل متوسطه ٦٠ %، فى حين أن إمكانات المحطات الكهرومائية الصغيرة بالبلاد تبلغ ٥٠٠٠ ميجاوات تقريبا يتوقع أن يقع ٣٠٠٠ ميجاوات منها فى نطاق ساقط منخفض. وتطور هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية برامج بحوث وتطوير إنشاء محطات كهرومائية ذات ساقط مائى ضئيل وعلى مستوى صغير وصالحة للتطبيق فنيًا واقتصاديًا، وتطوير القدرة المائية بربطها بمصادر الطاقة المتجددة الأخرى. ويبين الجدول رقم (١٥-٣) بيانا بالمحطات التى أقامتها هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية من محطات القوى ذات الساقط المائى العالى أو المتوسط أو شديد الصغر:

جدول (١٥-٣)

المحطات الكهرومائية الميكرونية التى أقامتها هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية

رتبة الساقط	الموقع	السعة المركبة	الساقط الصافى	التصرف م٣/ ث
مرتفع	جوبال (هيما تشال براديش)	١× ١٠٠ كيلووات	٨٨ م	٠,١٧
متوسط	مانالى (هيما تشال براديش)	٢ × ١٠٠ كيلووات	٤٠ م	٠,٨٠
شديد الصغر	كاكروى (هاريانا)	٣ × ١٠٠ كيلووات	١,٩ م	٣١,١٥
منخفض	رالا باتيندا (البنجاب)	١ × ٢٠٠ كيلووات	٣ م	٨,٥
	جانجا كانال - ساهارانبور (أوتار براديش)	١ × ١٢٥ كيلووات	٥,٥ م	٥,٦٦ لفترة ١٧ ساعة

اختيار الموقع:

يراعى عند التخطيط لمشروع محطة كهرومائية ميكرونية العوامل التالية:

معدل تدفق المياه:

لابد من العثور على البيانات عن الحد الأدنى للتأكد من القـدرة المولـدة، ويلزم بيانات عن فترة سنة على الأقل. وبالنسبة للساقط عبر قنوات مائيـة يلـزم بيانات لنفس الفترة لتحديد أدنى حد لتدفق المياه.

الساقط المائى الكلى وصافى الساقط المائي:

الساقط المائى الكلى هو الفرق بين منسوبى المـاء فـى مبنـى التحويـل **diversion structure** ، ومنسوبه عند المخرج من المحطة الكهرومائية. والـساقط المائى الحقيقى المتاح لتوليد القوى هو ما يطلق عليه الساقط الـصافى. ولحـساب قيمة الساقط الصافى نظريا ، ينبغى أن يطرح من الساقط الكلى الفواقد فى الـساقط نتيجة مرور المياه من مبنى التحويل إلى مدخل قناة أو بوابة للتحكم فى تدفقها وفى البوابات، وما إلى ذلك.

مستوى الطلب على الكهرباء وتقدير مقدار القدرة المولدة:

يمكن تقدير حجم الطلب على الكهرباء – فى المناطق المنعزلة – بناءً علـى عدد الوحدات السكنية، وتعداد السكان والصناعات القائمة والمبانى المؤسسية إلـى جانب التوسع المستقبلى المتوقع. ويمثل معامل الحمل عاملاً مهما وحاسـما عنـد وضع خطة إقامة محطة كهرومائية ميكرونية. ويحسب مستوى القدرة المتاحة من المعادلة:–

ق = η . ح. ع(*)

حيث ق = القدرة المولدة بالكيلووات

ح = الحد الأدنى من تدفق المياه م^{3} / ث

ع = الساقط الصافى بالمتر

η = معامل الكفاءة الكلى الذى يدخل فيه كفاءة التوربين و المولد (وقيمته حوالى ٠,٧٥)

مكونات محطات القوى الكهرومائية الميكرونية الأساسية

تتكون محطة القوى الكهرومائية الميكرونية من الأجزاء الأساسية التالية:

١) مبنى التفريق:

يفضل عمل سد فى هيئة أخدود فى حالة مبنى التفريق. وللمحطات الكهرومائية الميكرونية والصغيرة لاقى بناء سد من الشجيرات والجلاميد الضخمة نجاحا وقبولا اقتصاديا فى كثير من الحالات.

ويعتمد اختيار نوع مبنى التفريق على سعة المحطة وطبوغرافية المنطقة وملامحها الجيولوجية.

٢) موصل المياه:

تمد مجارى أو مواسير من الخرسانة الأسمنتية المسلحة من المأخذ مباشرة ، يتبعها نوع تقليدى من القنوات المفتوحة. ويمكن إدخال استعمال المواسير الصلب فى الاعتبار إذا ما خيف من حدوث انهيارات فى الصخور أو الأنقاض.

(*) يراعى فى المعادلة بهذه الصورة إدخال معامل للتحويل لاختلاف وحدات طرفى المعادلة (المترجم)

٣) أحواض إزالة العوالق silt:

والغرض منها اصطياد المواد العالقة والحصوات. ويستعمل حوض إزالة عند مأخذ (فتحة) موصل المياه. وتنخفض هنا سرعة السريان بنسبة محسوسة ، ويتوقف ذلك على حجم الأجسام المراد إزالتها فى غرفة الإزالة، والتى تفرغ أولا بأول فى أقرب بالوعة تصريف طبقاً للاحتياج.

٤) تركيبات الحوض الابتدائى والفائض:

يمكن تركيب حوض ابتدائى فى تصميمات المحطات المائية الميكرونية لضمان الحد من الساقط المائى عبر مأخذ القناة الصناعية التى تتحكم فى تدفق المياه لمنع دخول الهواء بها، ويعتبر عمق الثلاثة أمتار من المخزون كافيًا لذلك، وتركب بالمثل ترتيبات لتصريف الماء الفائض قرب الحوض الابتدائى الذى ليس هناك حاجة إليه لتوليد الكهرباء.

٥) البوابة الصناعية والخطاف:

ينتقل الماء – وهو تحت ضغط – من الحوض الابتدائى خلال أنابيب البوابة الصناعية إلى آلات التوليد وتدعم المواسير بكتل إرسائية على أكواع وعادة ما تستعمل كتل ممتدة طوليًا saddle blocks، وينبغى ضمان استقرار الطبقات تحت القناة الصناعية والمرساة والكتل قبل إتمام إنشاء القناة الصناعية.

٦) مبنى محطة القوى الرئيسية:

يتعين – لحماية وحدات التوليد ومعدات التحكم – أن يشيد مبنى محطة القوى من واقع استغلال المواد المحلية وأن يتمتع بالبساطة، ويصل ارتفاعه فى المتوسط من ٣ إلى ٥ أمتار، ويتوقف حجم المبنى على عدد وحدات التوليد والمسافات بين محاورها والمساحة اللازمة للمعدات الأخرى وساحة الصيانة.

٧) **قناة الصرف:**

يجب أن تكون ذات ميل وسعة كافيين بحيث يتم التصريف من الآلات فـــى الحال، وتتصل قناة الصرف الخاصة بكل وحدة بقناة عمومية خارج مبنى محطـــة القوى لتصريف المياه فى نهر قريب.

٨) **المعدات المساعدة ومحطة التوليد:**

المعدات الميكانيكية والكهربية اللازمة للمحطات المائية الصغيرة هى:

أ) بوابات وصمامات تحكم فى مسار المياه.

ب) توربين مائى ومولد مع ما يلزمه من معدات كهربية للحماية.

جـ) أوناش وآلات رفع وتحريك.

د) محول كهربى لرفع الجهد.

هـ) نظام توصيل أرضى للمعدات والآلات والمفاتيح الكهربية.

و) نظام مكافحة الحرائق.

ولتلافى أية مشاكل جيولوجية يتعين إجراء فحص جيولوجى على المنطقـــة المرشحة لإقامة المحطة.

التوربينات والمولدات:

فى توليد القوى بالمحطات المائية الميكرونية، يحول التوربين الطاقة المائية إلى طاقة ميكانيكية فى شكل حركة دورانية، وطبقًا لمبادئ سريان الماء وملامـــح التصميم، تصنف التوربينات إلى توربينات دفع وتوربينات رد فعل، ففى تـــوربين الدفع يتحول الساقط (فرق المنسوب) المتاح إلى طاقة حركية قبل دخول المجـــرى،

وتستخلص القدرة المستفادة من انسياب المياه وهى فى الضغط الجوى المعتاد، أما فى توربين رد الفعل فتكون قناة الدخول مغمورة بكاملها، ويتناقص كل من الضغط والسرعة على طول المجرى من المدخل إلى المخرج، وفى كلتا الآلتين يتساوى عزم الدوران مع معدل التغير فى العزم الزاوى داخل الآلة.

ولمحطات القوى المائية الصغيرة تستعمل المولدات من الأنواع التالية:

- مولدات الحث، وتستخدم عادة عندما توصل القدرة المولدة بالشبكة العمومية.
- مولدات متزامنة، وتستخدم عندما تكون محطات القوى مستقلة بشبكاتها.

البحوث والتطوير فى الهند:

تكمن المشاكل الرئيسية فيما يتعلق بتطوير المحطات المائية الصغيرة فى النقاط التالية:

١- انخفاض معامل الحمل.

٢- ارتفاع التكلفة الرأسمالية.

٣- مدى الإمكانية المتاحة وعلى وجه الخصوص فيما يخص المناطق ذات الساقط المائى شديد الانخفاض.

٤- تكاليف أعلى فيما يتعلق بوسائل التحكم والإدارة.

ويمثل انخفاض معامل الحمل للمحطات ذات منظومة توزيع منعزلة مشكلة حقيقية تعترض تطوير المحطات المائية الصغيرة، وتعود مشكلة ارتفاع التكلفة الرأسمالية للأعمال المدنية، والمعدات الكهروكيميائية،وربما أسهم التبسيط فى التصميمات فى تخفيض كل من التكلفة الرأسمالية والفترة اللازمة للإنشاء.

وقد أقامت هيئة مصادر الطاقة غير التقليدية مركزًا للطاقة المائية البديلة فى IIT برووركى من منظور تطوير بدائل جديدة من منظومات الطاقة المائية الصغيرة فى نطاقات الساقط المائى المنخفض جدًا فى المجارى المائية الصغيرة والمساقط المائية وبالذات فى المناطق الريفية والوعرة. وفيما يلى أهم انجازات المركز:

أ) تصميم وتطوير محلى لجهاز تحكم الكترونى فى الطاقة المنتجة (طور واحد وثلاثة أطوار) للاستعمال مع الوحدات المائية الميكرونية بهدف تقليص النفقات.

ب) تطبيقات لاستخدام المولدات الحثية.

جـ) تطبيق استخدام التوربينات بدون بوابات صغيرة **wicket** داخل البوابات الأكبر.

د) تطويرات فى تصاميم المأخذ من نوع السقوط الرأسى مع دوامية **vortex** لتحسين أداء إنشاءات المأخذ فيما يختص بتنظيف نفسه ذاتيًا.

هـ) تصميم وتطوير بوابات دائرية عمودية ثابتة لحالات الطوارئ والتحكم مع المحطات المائية الصغيرة ومتناهية الصغر.

و) تطوير تصميم لجهاز إزالة العوالق ذى تكلفة منخفضة وله ريشات موجهة (تم بناؤه فى محطة القوى المائية الصغيرة فى كاكروى).

ويعكف المركز فى الوقت الراهن على النشاطات البحثية والتطويرية التالية:

١) تعديل المضخة لتعمل كتوربين.

٢) تطوير منظومة تحكم تقوم على معالج ميكرونى للتحكم فى محطات القوى المائية الصغيرة ومتناهية الصغر وحمايتها.

٣) تطوير توربين ساقط سرعة **velocity head** لتسخير الطاقة مـــن الميـــاه المتدفقة.

٤) تطوير مولد ذى تردد ثابت وسرعة متغيرة للتطبيقات المائيـــة متناهيـــة الصغر.

٥) تطوير جهاز التحويل لغاز بغرض استعماله فى توليد القوى.

٦) التعرف على المشاكل التى تبرز فى موقع بعينه ووضع الحلول لها.

٧) يعمل المركز بالمثل على تطوير منظومات القوى المائية المهجنـــة مـــع مصادر الطاقة المتجددة الأخرى.

المـــــراجـــع

1. Handbook of indian Geography published in 2002 .

2. Handbook of Science and Technology in India published in 2002

3. R.J. Van Overstrasten and R.P.Mertens, Phys, Technology and use of Photovoltaics Published by Adam Hilger Ltd .

4. M.A. Green, Solar Cells Published by Prentice Hall.

5. Ken Zweibel, harnessing Solar Power Published by Plenum Press.

6. R.Pool, Science 241,900 (1988).

7. Department of Energy Report DOE/CH 10093-7(Solar Energy Research Institute Golden, CO 1987) .

8. P. Maycock, Ed.PV News 8, 2 (1989).

9. D.E. Carlson and C.R. Wronski, Appl. Phys. Lett. 28 671 (1976) .

10. H.N. Post and M.G. Thomas Sub. Energy 41, 465 (1998).

11. D.Morris EPRI J. 13, 46 (1998).

12. R. Mc Cormack, Energy Dailey 15, 1 (1987).

13. J.A. Duffie, W.A. Beckman "Solar Engineering of Thermal Proceesses", John Wiley and Sons, New York.

14. H.C. Hottel and B.B. Woertz Transactions of the American Society of Mechanical Engi-neers 64 91 (1942) "Performance of Flat-plate Solar Heat Collectors" .

15. F.S. Johnson Journal of Meteorology 11 431 (1954) "The Solar Constant" .

16. M.P. Thekaekara, Solar Energy 18 309 (1976) "Solar Radiation Measurement : Tech-niques and Instrumentation" .

17. A. Whillier, Solar Energy 9 164 (1965) "Solar Radiation Graphs" .

18. J.S. Hsieh, Solar Energy Engineerring, Prentice Hall Inc. (1986).

19. Solar Thermal Power, Solar Technical Information Program, Solar Energy Research Institute, SERI/SP-273-3047 , February, 1987.

20. P.K. Falcone, A handlook for solar central receiver design, Sandia National Laborato-ries, SAND 86-8009,(1986).

21. S.p. Sukhatme, Solar Energy- Principles of Thermal Collection and Storage, Tata McGraw-Hill, New Delhi (1989).

22. Jerrold H. Krenz, Energy (Conversion and Utilization) published by Allyn and Bacon, Inc.

23. P. Muffler and R. Cataedi 1978.

Methods for regional assessment of geothermal resources, Proceedings of the ENEL-ERDA workshop on Geothermal Resource Assessment and

Reservoir Engineering Larderllo, 1977-131-207, ENEL, Rome.

24. M.J. Aldrich, A.W. Langhlin and D.T. Gamhill 1981

Geothermal resource base of the world :

A revision of the EPRI's estimate, technical report I.A. 8531

University of California, Los Alamos Nation,'1Laboratory, New Mexico.

25. W.B. Godlord, C.B. Goddord, C.B. Goddord and D.W. Meclain 1989

Futureair quality maintenance and improvements through the expanded use of geothermal energy, Transactions of the Geothermal Resources Council 13 : 27-34.

26. S.W. Angrist 'Direct Energy Conversion' Allyn and Bacon Inc. Boston (1976).

27. J.H. Krenz 'Energy Conversion and Utilization Allyn and Bacon Inc. Boston (1976).

28. C. Petersen "Method for Transforming the Kinetic Energy of Gases into Electrical En-ergy" U.S. Patent No. 1,443, 091 (January 23, 1923).

29. E. RUPP, "Method of An Apparatus for Generating Electrical Energy" U.S.Patent No. 1, 916076 (June 27 , 1933) .

30. B. Karlovitz "Process for the conversion of Energy" U.S. Patent No. 2, 210-918 (August 13, 1940).

31. G.W.Sutton and A.Sherman, Engineering Magnetohydrodynamics (New York : McGraw-Hill Book Company, Inc. 1965).

32. L.P. Harris and J.D. Coline "The significance of the Hall Effect for Three MHD Genera-tor Configurations", Transactions of the ASME, Journal of Engg. for Power 83 A(1961) 392.

33. B.C. Lindley , "Some Economic and Design considerations of Large-scale MPD Genera-tors" in symposium on Magnetoplasmadynamic Electrical Power Generation (1976).

34. H.A. Liebhafsky and E.J. Cairns, fuel cells and Fuel Batteries (Nw York : John Wiley and sons, Inc 1968).

35. G.J. Young and R.B. Rozelle, "Fuel Cells" Journal of Chemical education 36 (1959) 68.

36. K.R. Williams, ed, An Introduction to fuel cells (Amsterdam : Elsevier Publishing Co. 1966).

37. S.W. Angrist, Direct energy Conversion, Ist ed. (Boston : Allyn and Bacon, Inc 1965).

38. J.H. Krenz, Energy-Conversion and utilization (Boston Allyn and Bacon, Inc 1976).

39. A.L. Reimann, Thermionic Emission (New York : John Wiley and Sons Inc., 1934).

40. J.M. Houston "Theoretical Efficiency of the Thermionic Energy Converters, Journal of Applied Physics 30. 481-487 , 1959.

41. G.N. Hatsopoulos, "Thermionic Energy Conversion", Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1996.

42. J.F. Morris "Performances of the Better Metallic Electrodes in Cesium Thermionic Con-verters" 7 th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1972.

43. B. Sherman, R. Heiles and R. Ure "Calculation of efficiency of Thermoelectric Device" Journal of Applied Physics 31, 1-16 (1960).

44. S. Lancashire, J. Kenna and P.Fraenkel Windpumping Handbook I.T. Publication (1987) .

45. T.Kovarik, C. Popher and J. Hurst "Wind Energy' Northbrook, Illinois (1979).

46. J.H. Dwinnell 'Principals of aerodynamics 'McGraw-Hill, New York (1949).

47. P.C. Putnam 'Power from the Wind' Van Nostrand Reinhold, New York (1948).

48. D.R. Smith, optimum rotor diameter for horizontal axis wind turbines : the influence of wind shear assumptions wind Engineering 6(1) 12-18 (1982).

G.L. Johnson, Wind Energy Systems. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.p. 7-13 (1985).

50. E., Rosillo-calle J. Woods and D.O. Hall 1992.

Country by country survey of biomass use and potential for energy, Biomass Energy Users Network Information Centre King's College, London.

51.B.M. Jenkins, 1989

Physical Properties of Biomass in O. Kitani and C.W. Hall, eds, Biomass handbook, 860-891, Gordon and Breach, New York.

52. D.O. Hall, 1989

Carbon Flows in the biosphere present and further J. Geol. Soc. 146; 175-181.

53. B. Bolin. 1986

How much CO2 will remain in the atmosphere ? In B. Bolin, B.R. Doos, J. Jager and R.A. Warrick eds.

54. J.R. Bolton and D.O. Hall, 1991

The maximum efficiency. of phototsynthesis, Photochemistry and Photobiology 53,545-548.

55. D.A. Walker, 1992

Excited leaves, Tansley review no. 36.

56. C.P. Mitchell, 1990

Nutrients and growth in short rotation forestry Biomass 22 : 91-105.

57. O.P. Vimal, and P.D., Tyagi, Fuelwood froom wastelands yatna Publications, New Delhi, 1986 .

58. State of Art Report on gasification of biomass. Interim Report of DNES Project Ministry of Energy Govt. of India by P.P. Parikh, IIT Bombay.

59. M. Dayal Renewable Energy-Environment and Development Konark Publishers Pvt. Ltd. 1989.

60. Lavi, A. et al. 1973

Plumbing the ocean depths : a new source of power, IEEE spectrum October .

61. Griekspoor, W. and Van der pot, B 1979

OTEC-Principles, problems and progress, offshore Engineer September.

62- Pergamon, 1980

Ocean Thermal Energy Conversion, Pergamon Press ISSN 0360-5442.

63. Internal conference on Energy Recovery (ICOEA) 1989 Ocean Energy recovery, Pro-ceeding of the first ICOER89, American Society of Civil Engineerrs.

64. Solar Energy Research Institute (SERI) 1989

Ocean Thermal Energy Conversion : An overview, SERI Golden Colorado.

65. La Rance 20 th Anniversary Colloquim papers 1986.

66. Fundy Tidal Power Workshop Papers 1990 .

67. U.K. Energy Paper 1989

The Severn Barrage Project : General Report, U.K. Energy Paper 57

68. World Energy Conference 1992

Ocean Energy Chapter 3 in World Energy Conference

Committee on Renewable Energy Sources

Opportunities and Constraints 1990-2020

69. J. M. Leishman, and G. Scobie 1976

U . K. National Engineering Laboratory Report EAUM25

70. X. Liang. Etal 1991

3 rd Symposium on Ocean Wave Utilizations Tokyo, Organized by the Japan Marine

Science and Technologe Centre Papers G-3 AND G-4 .

72. k. Nielsen 1991

3 rd Symposium on Ocean Wave Utilization JAMSTEC paper G-7 .

73- G. Hagerman and T. Heller, 1988

Proceedings of the International Renewable Energy Conferences Hawai 98-110

74. J.C. Fisher 1974

The Energy Crisis in Perspective, Wiley, New York .

75. K.A. Amankwali, J.S.NILI, J.A. Schwarz 1989. Hydrozen storage on superactivated carbon at refrigeration temperatures. International Journal of Hydrogen Energy, 14(7) : 437-447 .

76. C. Carpetis 1982. Comparison of the expenses required for the onboard fuel storage systems of hydrogen powered vehicles . International Journal of Hydrogen Energy, 7(1): 61- 77.

77. C. Carpetis 1984. An assessment of electrolytic hydrogen production by means of photo-voltaic energy conversion. International Journal of Hydrogen Energy, 9(12) : 969-991 .

78. C. Carpetis 1985. Break-even and optimization conditions for overall energy systems wherein hydrogen storage facilities are used. International Journal of Hydrogen En-ergy, 10(12) : 839-850.

79. C. Carpetis 1988. Storage, transport and distribution of hydrogen. In C J Winter, J

NITSCH (EDS), Hydrogen as an energy carrier, pp. 249-289. Berlin : Springer Verlag. 377 pp.

80. C. Carpetis, W . Peschka 1980. A study on hydrogen storage by use of cryoadsorbents. International Journal of Hydrogen Energy, 5(5) : 539 – 554.

81. M. A. DeLuchi 1989. Hydrogen vehicles : an evaluation of fuel storage, performance, safety, environmental impacts and cost. International Journal of Hydrogen Energy, 14(2) : 81 – 130 .

82. F J Edeskuty, K O Jr. Williamson 1979. Liquid hydrogen storage and transmission. In K E Cox, K D Williamson (eds), Hydrogen – its technology and implications, Vol. II.Florida : CRC Prss. 175 pp.

83 .U E Lindblom 1985. Hydrodynamic containment of pressurized hydrogen in fractured rock. International Journal Hydrogen Energy, 10(10) : 667-676 .

84. W . Peschka 1992. Status of handling and storage techniques for liquid hydrogen in mo-tor vehicles. International Journal of Hydrogen Energy, 12 (11) : 753- 764.

85. W. Peschka 1992. Liquid hydrogen, fuel of the future. Wien : Springer Verlag. 304 pp.

86. W.Peschka 199. the use of hydrogen for vehicles. IN VDI-Berichte. Nr. 1020 : Proceed-ings 12. VDI / VW Symposium, Wolfsburg, Germany, 1992 (in English) .

87. J B Pholenz, Stine L O. 1962a. New Process promises low cost hydrogen. Oil and Gas Journal, 60 : 82 – 85.

88. J B Pohlenz, L O Stine.1962b. New process makes hydrogen from fuel gases. Hydrocar-bon Processing and Petrol. Ref. 41 : 191 – 194.

89. S. Suda 1987. Metal hydrides. International Journal of Hydrogen Energy, 12(5) : 323 – 331.

90. O. Ullmann 1989. Hydrogen in air transportation and space travel. Brussels : Commis-sion of the European Communities, Contract No. 3338-87-12.

91. K D Williamson, F J Edeskuty 1986. Recent developments in hydrogen technology, Vol. II. Florida : CRC Press. 154 pp.

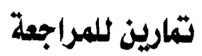
92. Raymond Jasinki. High-Enerry Batteries, Plenus Press, New York (1967) .

93. Donalt Marics, Wind Power, Rodale Press (1981) .

94. Horne R.and D. Richardson, Proc. Ann. Power Sources Cont. 18, 75 (1964) .

95. Vinal G. Storage Batteries, John Wiley and Sons. New York (1955).

96. E. Voss, Effects of Phosphoric Acid Additions on the Behaviour of the Lead-Acid Cell : A Review J. of Power Sources, 24 (1988) 171- 184 . 97. Daniel Dendney, "Rivers of Energy : The Hydropower potential" Worldwatch Paper44 (Washington, D.C. : Worldwatch Institute, June 1981), p. 10. Based on data reported in World Energy Supplies.


تمارين للمراجعة

الباب الأول: مصادر الطاقة:

١ – تكلم عن تصنيفات مصادر الطاقة وتبويبها.

٢ – ما موقف الاحتياطى الحالى من الفحم فـى الهنـد؟ نـاقش تـصنيف الفحومات إلى أنواع فيما يختص بمشاكل تعدين الفحم.

٣ – تكلم بالتفصيل عن احتياطيات النفط والغاز الطبيعى والإنتـاج منهمـا ومواطن المشاكل فيما يتعلق بهما.

٤ – ما سعات توليد القوى المركبة حاليًا بالهند؟ ناقش نسب مساهمة الأنواع المختلفة من محطات القوى فيها.

٥ – اكتب باختصار عن القاعدة الصناعية التى استحدثت بالهند فى تقنيـات الطاقة المتجددة المتنوعة.

٦ – ناقش مزايا وعيوب الابتكارات التقنية فى الهند فيما يختص بـالأفرع المختلفة للطاقة المتجددة.

الباب الثانى: الخلية الشمسية:

١ – وضح بالرسومات البيانية التخطيطية عمل الوصلة الكهروضوئية.

٢ – ما المتطلبات الأساسية للحصول على خلية شمسية ذات كفاءة؟

٣ – ارسم منحنى علاقة نمطيًا بين فرق الجهد والتيار عبر الحمـل لخليـة شمسية تحت مستوى معين من الاستضاءة.

٤ – اثبت أن أقصى مردود من القوى من خلية شمسية يعطى بالعلاقة:

$$\text{ق}_{\text{ح}} = \frac{\text{أ ف}_{\text{ح}}}{\text{بو . د}} \div \left(١ + \frac{\text{أ ف}_{\text{ح}}}{\text{بو . د}} \right) . \text{ف}_{\text{ح}} \left(\text{ت}_{\text{ص}} + \text{ت.} \right)$$

٥ – ما عوامل الأداء المختلفة التى تحد من عمل الخلية الشمسية؟

٦ – اكتب مذكرة عن اختيار المواد لعمل خلية شمسية.

٧ – ناقش الخواص المرغوبة فى أشباه الموصلات لاستعمالها فى خلية شمسية.

٨ – ما المجموعة المعيارية من الخلايا الكهروضوئية؟ ناقش تأثير درجة الحرارة على أداء هذه المجموعة؟

٩ – ناقش أحدث التطورات فى مجال الكهروضوئيات؟

١٠ – ما أهم القضايا والمحددات فى مجال توليد القوى الكهروضوئية؟

١١ – ناقش الجوانب الاقتصادية فى توليد القوى كهروضوئيًا.

١٢ – احسب نطاق الطول الموجى للإشعاع الشمسى القادر على إحداث ثنائيات من الإلكترونات والفتحات فى السليكون، علما بأن فجوة الطاقة بالنسبة للسليكون تبلغ ١,١٢ إلكترون فولت (الإجابة ١,١١ ميكرون).

١٣ – عندما تتعرض خلية كهروضوئية لتشميس قدره ٩٥٠ وات /م٢ يبلغ تيار القصر ٢٢٠ أمبير /م٢ على أساس وحدة المساحات من الوصلة المعرضة، فإذا كانت فولتية الدائرة المفتوحة ٠,٦ فولت، ودرجة الحرارة ٣٠٠ على مقياس كلفن، احسب:

(أ) تيار التشبع العكسى.

(ب) قيمة فرق الجهد التى تحقق أقصى قدرة.

(جـ) قيمة تيار الحمل الذى يحقق أقصى قدرة.

(د) الحد الأقصى للقدرة.

(هـ) أقصى قيمة لكفاءة التحويل.

(و) مساحة الخلية كى تعطى قدرة مقدارها ١ كيلو وات تحت ظروف الحد الأقصى للقدرة.

ملحوظات:

(أ) $\frac{\text{ت}_{\text{ص}} \div \text{س}}{\text{ت}_{.} \div \text{س}} = \text{هـ}^{\frac{\text{أف}_{\text{دم}}}{\text{بو.د}}} - ١ = ١,١٩٣ \times ١٠^{١٠}$

$\frac{\text{ت}_{.}}{\text{س}} = \frac{٢٢٠}{١,١٩٣ \times ١٠^{١٠}} = ١,٨ \times ١٠^{-٨}$ أمبير / م^{٢}

(ب) قيمة الفولتية التى تحقق أقصى قدرة تعطى بالمعادلة:

$\text{هـ}^{\frac{\text{أف}_{\text{ح}}}{\text{بو.د}}} . \left(١ + \frac{\text{أف}_{\text{ح}}}{\text{بو.د}}\right) = ١ + \frac{\text{ت}_{\text{ص}} \div \text{س}}{\text{ت}_{.} \div \text{س}}$ (يمكن تطبيق معادلة نيوتن – رابليسون لحساب الجذور الحقيقية).ف$_{\text{ح}}$ = ٠,٥٢ ف

(جـ) $\frac{\text{ت}_{\text{ح}}}{\text{س}} = \frac{\text{أف}_{\text{ح}} \div \text{بو.د}}{١ + (\text{أف}_{\text{ح}} \div \text{بو.د})} \left[\frac{\text{ت}_{\text{ص}}}{\text{س}} + \frac{\text{ت}_{.}}{\text{س}}\right] = ٢١٠$ أمبير / م^{٢}

(د) $\frac{\text{أقصى قدرة}}{\text{س}} = \frac{\text{ت}_{\text{ح}}}{\text{س}} . \text{ف}_{\text{ح}} = ١٠٩$ وات / م^{٢}

(هـ) أقصى كفاءة $= \frac{\text{أقصى قدرة} \div \text{س}}{\text{قدرة التشميس} \div \text{س}} = \frac{١٠٩}{٩٥٠} = ١١,٥\%$

(و) المساحة س $= \frac{\text{القدرة المخرجة المطلوبة}}{\text{أقصى قدرة} \div \text{س}} = \frac{١٠٠٠}{١٠٩} = ٩,١٧$ م^{٢}

١٤ – اكتب مذكرة عن الآفاق المستقبلية للكهروضوئيات؟

البابان الثالث والرابع:

الإشعاع الشمسى ومجمعات الطاقة الشمسية:

١ – اشرح ما يلى:

(أ) زاوية الميل δ.　　(ب) الثابت الشمسى.

(جـ) الزمن الشمسى.　　(د) الكتلة الهوائية.

٢ – اكتب صيغة تعبر عن الإشعاع القادم من خارج الغلاف الجوى على سطح أفقى.

٣ – كيف يمكن تقدير قيمة الإشعاع الشمسى لدى موضع بعينه؟

٤ – كيف يحسب متوسط الإشعاع على سطح مائل مثبت؟

٥ – ما مجمع الطاقة الشمسية ذو الصفيحة المستوية؟ ناقش كيفية توجيه مجمع شمسى ذى صفيحة مستوية للحصول على أقصى مردود.

٦ – بين طريقة لاختبار أداء مجمع شمسى.

٧ – ماذا يقصد بمجمعات التركيز؟

٨ – تكلم عن التصميمات المختلفة لمسخنات المياه الشمسية.

٩ – كيف يمكننا استعمال الإشعاع الشمسى فى أغراض تدفئة الأماكن؟

١٠ – ناقش استعمال الإشعاع الشمسى لأغراض تبريد الأماكن.

١١ – ناقش الأنواع المختلفة من التقنيات الكهربية الحرارية الشمسية.

١٢ – احسب طول ساعات النهار على سطح أفقى بنيودلهى (خط عـرض ٣٥َ ٢٨ْ شمالا وخط طول ١٢َ ٧٧ْ شرقا) يوم ١ ديسمبر.

(طول ساعات اليوم = $\frac{٢}{١٥}$ جتا$^{-١}$ (–ظا ٢٨,٥٨ْ ظا (–٢٢,١١ْ) = ١٠,٣ ساعة

١٣ – احسب الزمن الشمسى المناظر للـساعة ١٤٣٠ (التوقيـت القياسـى الهنـدى) بمدينة بومـباى (خـط عرض٧َ ١٩ْ شمالاً، خـط طـول ٥١َ ٧٢ْ شرقا يوم ١ يوليو علما بأن التوقيت القياسى الهنـدى علـى أساس خط طول ٨٢,٥ْ شرقًا.

الزمن الشمسى = ١٤٣٠ – ٤ (٨٢,٥ – ٧٢,٨٥) دقيقة + (–٤ دقائق).

= ١٤٣٠ – ٣٨,٦ دقيقة – ٤ دقائق = الساعة ١٣٤٧

١٤ – ما الإشعاع الشمسى اليومى على سطح أفقى بافتراض غياب الغلاف الجوى I عند خط عرض ٤٣ْ شمالا يوم ١٥ إبريل؟

(الإجابة ٣٣,٤ ميجا جول / م^{٢}).

١٥ – ما مقدار الإشعاع الشمسى على سطح أفقى فى غياب الغلاف الجوى عند خط عرض ٤٣ْ شمالا يوم ١٥ إبريل ما بـين الـساعة العاشـرة والحادية عشرة صباحًا؟

(الإجابة ٣,٧٥ ميجا جول / م^{٢}).

١٦ – ناقش تركيب جهاز البيرانومتر وكيفية عمله.

١٧ – كيف تستعمل البيروهليومتر لقياس الإشعاع الحزمى؟

١٨ – ناقش استعمال جهاز تسجيل درجة سطوع الشمس لقياس فترة هـذا السطوع.

١٩ – اشرح المبادئ التى يعمل على أساسها كل من:

(أ) جهاز الطهى الشمسى.

(ب) جهاز تحلية المياه شمسيًا.

(جـ) جهاز التجفيف بالشمس.

الباب الخامس: تخزين الطاقة الشمسية:

١ – ناقش كيفية تخزين الطاقة الشمسية فى أحواض المياه ذات الطبقات.

٢ – اشرح كيفية عمل وحدة تخزين الطاقة من نوع الحوض ذى الحصوات فى منظومة تسخين بالطاقة الشمسية عن طريق الهواء.

٣ – كيف تبين أن التخزين عن طريق التحويلات الطورية يعنى توفيرًا فى الحيز مع تطبيقات الطاقة الشمسية؟

٤ – ما المشكلات المتعلقة باستعمال الهيدريدات فى تخزين الطاقة الشمسية؟

٥ – اشرح أساس عمل الحوض الشمسى، وناقش بعضًا من تطبيقاته.

٦ – ناقش قواعد تشغيل وصيانة بطاريات التخزين المستعملة فى المنظومات الكهروضوئية.

٧ – ما تأثير إضافة حمض الفسفوريك للبطاريات الرصاصية الحمضية؟

الباب السادس: طاقة باطن الأرض الحرارية:

١ – ناقش مصادر طاقة الأرض الحرارية المختلفة.

٢ – كيف يمكن استغلال طاقة باطن الأرض الحرارية؟

٣ – اشرح كيفية عمل محطات القوى بطاقة الأرض الحرارية وناقش التطورات التقنية المختلفة فيها.

٤ – ما الآفاق المستقبلية لاستغلال طاقة باطن الأرض الحرارية فى الهند؟

٥ – كيف تتأثر البيئة نتيجة تشغيل محطات القوى بطاقة باطن الأرض الحرارية؟

الباب السابع: مولدات القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية:

١ – قارن بين عمل المولد التوربينى التقليدى والمولد المغناطيسى الهيدروديناميكى.

٢ – كيف يتأين الغاز فى المولد المغناطيسى الهيدروديناميكى؟

٣ – اشرح عمل المولد المغناطيسى الهيدروديناميكى.

٤ – ما المشاكل المتنوعة فيما يتعلق بتوليد القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية؟

٥ – كيف يمكن تقليص الفواقد المغناطيسية فى المولد المغناطيسى الهيدروديناميكى إلى الحد الأدنى؟

الباب الثامن: خلية الوقود:

١ – اشرح – برسم تخطيطى – كيفية عمل خلية الوقود.

٢ – استخلص صيغة للتعبير عن كفاءة خلية الوقود.

٣ – ما العوامل المختلفة التى تحد من أداء خلية الوقود؟

٤ – اشرح عمل خلية الوقود الهيدروجينية الأكسجينية، وبين أن أقصى كفاءة لها تبلغ ٨٣%.

٥ – ما أنواع خلايا الوقود المختلفة؟ اشرح أداء كل منها.

٦ – ماذا يقصد بخلايا الوقود التجديدية؟

الباب التاسع: المولدات الأيونية الحرارية والكهروحرارية:

١ – ما المبدأ الأساسى فى عمل المولد الأيونى الحرارى؟

٢ – ما الوضعيات الرئيسية لتشغيل المحولات الأيونية الحرارية العاملة ببخار السيزيوم؟

٣ – ناقش الخواص المهمة فى مادة مبتعثة جيدة للاستعمال فى محول أيونى حرارى.

٤ – حلل عمل مولد كهروحرارى.

٥ – استنبط صيغة للتعبير عن القدرة المتحصل عليها من مولد كهروحرارى.

الباب العاشر: طاقة الرياح:

١ – بين أن كثافة طاقة الرياح ف ر = $\frac{١}{٢}$ ث ع٣، حيث ث هى كثافة الهواء، ع هى سرعة الرياح.

٢ – ما أقصى قدرة يمكن استخلاصها من تيار من الرياح؟

٣ – اكتب الصيغة التى تعبر عن دالة كثافة احتمالية رالى.

٤ – اشرح المبدأ فى تحويل طاقة الرياح

٥ – ناقش المتغيرات التالية التى تراعى عند تصميم الجزء الدوار:

(أ) الخطوة.

(ب) نسبة الإشغال.

(جـ) نسبة السرعة الطرفية.

(د) معامل الأداء.

(هـ) عزم الدوران.

٦ – ابحث تصميمات الدوار المختلفة والمزايا والعيوب النسبية فى كل منها.

٧ – كيف يتم تقييم صلاحية موقع ما لتشييد منظومة لقوى الرياح به؟

٨ – اشرح – برسم تخطيطى – الخطوات المتخذة لمعالجة البيانات عن الرياح.

٩ – ما قيمة القدرة الخارجية المتاحة من توربين رياحى؟

١٠ – ما المنظومات الفرعية المساعدة للتوربين الرياحى؟

١١ – ناقش الوضع الحالى والآفاق المستقبلية لاستغلال طاقة الرياح بالهند

١٢ – جزء دوار فى توربين رياحى، قطره ٦ أمتار وله ٢٤ ريشة عرض كل منها ٠,٣٥م.

احسب نسبة الإشغال:

الإجابة: (نسبة الإشغال = $\frac{٢٤ \times ٠,٣٥}{ط \times ٦}$ × ١٠٠ = ٤٥ %).

١٣ – جزء دوار قطره ٦ أمتار يدور بمعدل ٢٠ لفة / دقيقة، وتبلغ سرعة الرياح ٤ م / ث احسب نسبة السرعة الطرفية للدوار

الإجابة: (نسبة السرعة الطرفية = $\frac{ط \times ٦ \times ٢٠ \div ٦٠}{٤}$ = ١,٦).

الباب الحادى عشر: الطاقة من المصادر الحيوية:

١ – بين بالرسم كيف تشكل الطاقة من المصادر الحيوية نحو ١٥% من الاستهلاك العالمى من الطاقة، ٣٨% من الاستهلاك الكلى فى الدول النامية.

٢ – لماذا تعتبر المصادر الحيوية للطاقة ذات أهمية خاصة فى الدول النامية مثل الهند؟

٣ – ناقش كفاءة إنتاج المادة الحيوية وتداعيات ارتفاع نسبة ثانى أكسيد الكربون على إنتاجها.

٤ – اكتب بإيجاز عن التطورات فى مجال الطاقة من المصادر الحيوية.

٥ – ناقش الموقف الحالى لتقنيات تحويل الطاقة الحيوية.

٦ – اشرح عمل مختلف أنواع محولات المادة الحيوية لغاز.

٧ – ما الآفاق المستقبلية لتطور الغاز الحيوى بالهند؟

٨ – تكلم عن مصانع الغاز الحيوى المتطورة بالهند.

٩ – ما المشاكل المختلفة التى تعيق تطور إنتاج الغاز الحيوى؟

الباب الثانى عشر: تحويل طاقة المحيطات الحرارية:

١ – اشرح تقنية تحويل طاقة المحيطات الحرارية.

٢ – ما أنشطة البحوث والتطوير المتنوعة فى مجال تحويل طاقة المحيطات الحرارية؟

٣ – ما الآثار البيئية المحتملة نتيجة تشغيل محطة لتحويل طاقة المحيطات الحرارية؟

الباب الثالث عشر: طاقة الأمواج وموجات المد والجزر:

١ – ناقش الأسباب وراء حدوث موجات المد والجزر.

٢ – ما أهم أنشطة البحوث والتطوير المختلفة فى مجال طاقة موجات المد والجزر؟

٣ – ابحث الآثار البيئية المتنوعة الناجمة عن تشغيل محطة قوى بطاقة موجات المد والجزر.

٤ – كيف تتولد الأمواج فى المحيطات؟

٥ – ناقش مصادر طاقة الأمواج وتقنياتها.

٦ – اكتب مذكرة عن أنشطة البحوث والتطوير فى مجال طاقة الأمواج.

٧ – ما تكلفة الكهرباء المنتجة من محطة قوى بطاقة الأمواج؟ تحدث عن مختلف الآثار البيئية لاستغلال طاقة الأمواج؟

الباب الرابع عشر: الطاقة من الهيدروجين:

١ – لماذا يشار إلى الهيدروجين على أنه مصدر ثانوى للطاقة؟

٢ – ما القضايا الأساسية التى يلزم بحثها عند إدراج الهيدروجين كمصدر للطاقة؟

٣ – ناقش أحدث التطورات فى تقنية تخزين الهيدروجين.

٤ – اشرح تصنيف منظومات تخزين الهيدروجين وأجهزتها.

٥ – ما الأساليب المختلفة لتخزين الهيدروجين؟

٦ – اكتب مذكرة عن تكلفة تخزين الهيدروجين.

٧ – ناقش تكلفة التخزين لمنظومات تخزين الهيدروجين الثابتة الضخمة.

الباب الخامس عشر: محطات القوى الكهرومائية متناهية الصغر:

١ – كيف تولد الطاقة الكهربية فى محطة القوى الكهرومائية؟

٢ – ناقش الإمكانيات الحالية فى مجال الطاقة الكهرومائية.

٣ – كيف تصنف محطات القوى الكهرومائية الصغيرة؟

٤ – ما مفهوم القوى الكهرومائية متناهية الصغر بالهند؟ وما إمكانياتها؟

٥ – ما النقاط التى ينبغى أخذها فى الاعتبار لدى تصميم مشروع لقوى كهرومائية متناهية الصغر؟

٦ – ناقش الملامح الرئيسية لمخطط محطة القوى الكهرومائية متناهية الصغر.

٧ – ما أهم أنشطة البحوث والتطوير الأساسية التى تجرى فى الوقت الراهن بالهند فى مجال القوى الكهرومائية متناهية الصغر؟

نموذج لورقة أسئلة امتحان جامعى

للدرجة البكالوريوس

امتحان الفصل الدراسى السابع عام ٢٠٠٤ – ٢٠٠٥

فى مادة مصادر الطاقة غير التقليدية

الزمن المسموح به: ٣ ساعات مجموع الدرجات الكلى: ١٠٠ درجة

المطلوب حل جميع الأسئلة

١ – أجب على أربعة أجزاء مما يلى: (٥ × ٤ = ٢٠ درجة)

(أ) ناقش ما إذا كان إدخال مفهوم مصادر الطاقة غير التقليدية إلى بلدنا متاحًا.

(ب) ما العقبات من الناحية العملية فى استغلال مصادر الطاقة غير التقليدية؟

(ج) ناقش مزايا وعيوب ومصادر الطاقة غير التقليدية مقارنة بمصادرها التقليدية.

(د) ما العوامل التى تحد من استعمال الخلايا الشمسية؟

(هـ) ناقش آلية عمل الخلية الشمسية من ناحية فيزيائيات أشباه الموصلات.

(و) ما المواد المستخدمة فى تصنيع الخلايا الشمسية؟ وما نطاق جهدها الكهربى؟

٢ – أجب على أربعة أجزاء مما يلى: (٥ × ٤ = ٢٠ درجة)

(أ) ناقش كيفية عمل مجمع شمسى ذى صفائح مستوية.

(ب) ناقش كيفية أداء المجمعات الشمسية ذات الصفائح المستوية.

(جـ) تكلم عن المواد المختلفة المستعملة فى تصنيع المجمعات الشمسية ذات الصفائح المستوية.

(د) ناقش مدى إتاحية طاقة جوف الأرض الحرارية.

(هـ) كيف تتم التدفئة بالطاقة الشمسية موضحًا إجابتك برسم تخطيطى لذلك؟

(و) كيف يجرى تركيز الإشعاع فى المجمعات الشمسية ذات شكل القطع المكافئ المجسم؟

٣ – أجب عن جزأين مما يلى: (١٠ × ٢ = ٢٠ درجة)

(أ) تكلم عن أسس عمل محطات القوى المغناطيسية الهيدروديناميكية.

(ب) ما الأنواع المختلفة المتاحة من خلايا الوقود؟

(جـ) ناقش كيفية أداء خلايا الوقود المتاحة المختلفة، وما محدداته؟

٤ – أجب عن جزأين مما يلى: (١٠ × ٢ = ٢٠ درجة)

(أ) اشرح نظرية عزم الحركة فيما يختص بقدرة الرياح.

(ب) تكلم عن خصائص الرياح المميزة، وعن أداء منظومات تحويل الطاقة والعوامل التى تحدها.

(جـ) اشرح كيف يمكن تحويل الطاقة من المصادر الحيوية إلى كهرباء.

٥ – أجب عن جزأين مما يلى **(١٠ × ٢ = ٢٠ درجة)**

(أ) ناقش نظرية منظومات تحويل طاقة المحيطـــات الحراريـــة والمبـــادئ الأساسية فى عملها.

(ب) ناقش المبادئ الأساسية فى منظومة تحويل طاقة الأمواج وموجات المد والجزر، وكيفية عملها.

(جـ) تكلم عن أداء محطات القوى القائمة علـــى تحويـــل طاقـــة الأمـــواج وموجات المد والجزر ومحدداتها.

المؤلفان فى سطور

د. س. شاوهان

- هو نائب رئيس الجامعة الفنية فى "لوكناو".
- حاصل على درجات البكالوريوس والماجستير والدكتوراه فى الهندسة ونظم القوى.
- له بحوث مع وكالة "ناسا"، ونال جائزة "المهندس" لسنة ٢٠٠١ من معهد المهندسين.
- كما أن له ٤١ بحثًا فى مجالات الطاقة.

س. ك. سريفا ستافا:

- هو أستاذ الفيزيائيات فى معهد الهندسة والتكنولوجيا بلوكناو.
- حاصل على الماجستير والدكتوراه فى مجال الطاقة غير التقليدية.

وله فيها ٥٠ بحثًا، كما أنه أشرف على العديد من الرسائل العلمية عن الطاقة المتجددة.

المترجم فى سطور

عاطف يوسف محمود

- حاصل على درجة البكالوريوس فى الهندسة الميكاينكية – جامعة القاهرة فى ١٩٦٦.
- حاصل على درجتى الماجستير (١٩٧٢) والدكتوراه (١٩٧٦) فى صناعة الحديد والصلب.
- له بحوث علمية عديدة باللغات العربية والإنجليزية والروسية نشرت فى مجلات عربية وأجنبية.
- حائز على لقب مهندس استشارى من نقابة المهندسين المصرية فى مجال دراسات الجدوى وتقييم المشاريع الصناعية.
- يقوم بالترجمة ونشر المقالات العلمية: مجلة العربى الكويتية.
- قام بترجمة كتب "السفر عبر الزمن فى كون أينشتاين" تأليف ريتشارد جوت، المرجع فى روايات الخيال العلمى "لكيث بوكر وآن مارى توماس"، منظومتنا الشمسية بين الصدفة والمصير "تأليف ستيوارت تيلور"، منظور جديد فى كونيات الفيزياء الفلكية، تأليف مارتن ريس، وذلك لحساب المركز القومى للترجمة.

التصحيح اللغوى: أيمن صابر

الإشراف الفنى: حسن كامل



ينصب اهتمام العالم بأسره اليوم على الحفاظ على البيئة، ومن شأن مصادر الطاقة غير التقليدية أن توفر طاقة نظيفة تقلل من تأثير التلوث والتصحر المتزايدين. ويناقش هذا الكتاب التطورات الجارية فى مجال مصادر الطاقة غير التقليدية وتطبيقاتها، وقد تم فيه تغطية رءوس الموضوعات بصورة تامة، بما يكفل لطلبة درجة البكالوريوس الفنى الانتفاع به فى مناهجهم الدراسية مثل مصادر الطاقة غير التقليدية، والطاقة المتجددة، وهندسة الطاقة الشمسية وتشمل الموضوعات: الإشعاع الشمسى، ومجمعات الطاقة الشمسية، ومصادر الطاقة، والخلايا الشمسية، وتوليد الطاقة المغناطيسية الهيدروديناميكية، وطاقة الرياح، والمصادر الحيوية للطاقة، واستغلال طاقة المحيطات الحرارية، وطاقة الأمواج وموجات المد والجزر، والطاقة من الهيدروجين، ومحطات القوى الكهرومائية الصغيرة ، وتخزين الطاقة الشمسية.